



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**Análisis de la calidad del
aire en la región de
Atacama, Chile**

Trabajo realizado por:

Marilyn Janet Bravo Vergara

Dirigido por:

Dr. José María Baldasano Recio

Máster en:

Ingeniería Ambiental

Barcelona, 23 de enero de 2018

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Agradecimientos

Primeramente agradezco a mis padres: Jorge y Marisa, a mis hermanas: Valentina y Paula y a mi sobrinito Matías, por el amor incondicional, el apoyo en todo sentido y la energía que siempre me han dado. A pesar de la distancia, siempre han estado presente y me han demostrado su amor y apoyo.

A mi familia en general y a esa energía positiva que siempre me cuida y me protege. A mis abuelitos y papis, que a pesar que no están físicamente, constantemente siento que me están cuidando y brindando su amor.

A mi asesor, el Dr. José María Baldasano Recio, ya que gracias a él aprendí mucho sobre contaminación atmosférica, cambio climático y modelización. Sus clases me motivaron y me siento muy agradecida que aceptase ser mi asesor de tesis. Gracias a sus asesorías, aprendí sobre la calidad del aire y logré terminar con éxito el trabajo final de máster. Le estoy muy agradecida por el tiempo dedicado.

A mis amigas de siempre, las cuales estuvieron pendientes de mí, a pesar de la distancia y preguntando cuándo volvía a Chile: Ana, Estefa, Miyo, Nicole y Pauli. A mis amigos Bts que son como mi familia santiaguina: Dafne, Diego C., Diego S., Karen, Kenny, Muriel, Naty, Pame, Pancho, Pablito, Sonia, Stampy y Vero.

A mis amigos que conocí gracias al Máster, que me apoyaron tanto dentro como fuera del aula y con los que compartí momentos y viajes inolvidables: Eunice, Irene, Michelle, Mirta y Scott. A Claudia, Erika, Espe, Felipe, Kari, María Paz y Oscar que los conocí en Barcelona, estuvieron pendientes de mí y me demostraron su cariño. A Ignasi, mi primer mejor amigo, gracias por las mudanzas, el apoyo y toda la experiencia vivida... aprendí a conocerte, entenderte y quererte. A todos los que estuvieron presente en estos 2 años de mi vida en Barcelona, gracias por los momentos vividos: buenos y malos, siempre estuvieron aconsejándome y apoyando. Estoy segura que nuestros caminos se volverán a cruzar.

A la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT), por el financiamiento que me permitió realizar el máster en el extranjero.

A todos ellos y a muchas otras personas que conocí en Barcelona o dejé en Chile.

Estoy muy agradecida de la vida y hoy siento que he crecido no solo en conocimiento sino que como persona, pues mi mentalidad es distinta a la que tenía hace 2 años atrás, espero actuar siempre de la mejor manera posible y poner en prácticas todo lo aprendido.

Marilyn Janet Bravo Vergara

Tabla de contenido

Agradecimientos	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
Resumen.....	9
1. Introducción	11
2. Planteamiento del Problema	12
2.1 Objetivo General	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. Área de estudio	13
3.1 Características Geográficas	16
3.2 Clima.....	16
3.3 Vegetación.....	17
3.4 Precipitación.....	17
3.5 Temperatura.....	18
3.6 Radiación Solar	18
3.7 Viento	20
3.8 Actividades económicas	21
3.9 Parque vehicular:	26
4. Contaminación Atmosférica.....	28
4.1. Fuentes de contaminación	28
4.2. Principales Contaminantes Atmosférico	29
4.2.1 Dióxido de Azufre (SO ₂)	29
4.2.2 Óxidos de Nitrógeno (NO _x).....	30
4.2.3 Materia Particulado (PM)	30
5. Sistema de monitoreo ambiental.....	30
5.1 Estaciones de monitoreo ambiental en la región de Atacama	31
5.2 Técnicas de mediciones de los contaminantes	34
5.2.1 Dióxido de azufre (SO ₂)	34
5.2.2 Óxidos de nitrógeno (NO _x)	35
5.2.3 Materia Particulado (PM).....	35
6. Normativa.....	36

6.1 Normativa Chilena.....	36
6.2 Normativa Estadounidense (EPA)	37
6.3 Normativa Unión Europea (UE).....	38
6.4 Valores guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS).....	39
7. Metodología de Investigación.....	40
7.1 Validación de los datos.....	41
7.2. Análisis de los datos validados	43
8. Antecedentes de la Región de Atacama	43
9. Resultados y Discusión	46
9.1 Análisis de las concentraciones por contaminantes y comparación con las normativas vigentes.....	46
9.1.1. Dióxido de azufre (SO ₂)	46
9.1.2 Óxidos de Nitrógeno (NO _x).....	74
9.1.3 Materia Particulado (PM).....	78
10. Conclusiones y Recomendaciones	93
11. Bibliografía	97

Índice de Figuras

Figura 3.1. Ubicación de la región de Atacama.....	14
Figura 3.2. Región de Atacama y sus principales asentamientos urbanos. Elaboración propia.	15
Figura 3.3. Precipitaciones promedio de la región de Atacama desde los meses de enero a diciembre. Fuente: Climate data, 2018.....	17
Figura 3.4. Promedios, máximas y mínimas de temperaturas en la región de Atacama desde enero a diciembre. Fuente: Climate data, 2018.....	18
Figura 3.5. Rosa de vientos (%) de las estaciones Caldera (2007-2009) y Tierra Amarilla (2007-2010). Fuente: Arcadis, 2010.	21
Figura 3.6. Mineras subterráneas localizadas en la región de Atacama. Elaboración propia.....	22
Figura 3.7. Mineras a cielo abierto localizadas en la región de Atacama. Elaboración propia...	23
Figura 3.8. Ubicación de fundiciones y termoeléctricas. Elaboración propia.	24
Figura 3.9. Ubicación de los puertos de la región de Atacama. Elaboración propia.....	26
Figura 5.1. Ubicación de las estaciones. Fuente: SINCA, 2018. Elaboración propia.	32
Figura 9.1. Ubicación del poblado El Salvador (rojo con punto negro), de la Minera El Salvador (verde), de la fundición Potrerillos (rojo) y de las estaciones DI y CAP (amarillo).....	47
Figura 9.2. Concentraciones diarias de SO ₂ en la provincia de Chañaral, desde año 2001 al 2010.	48
Figura 9.3. Ubicación de la fundición Potrerillos y de la estación DI.	51
Figura 9.4. Imagen de la chimenea de la fundición Potrerillos.	51
Figura 9.5. Concentraciones anuales de SO ₂ en las estaciones CAP y DI, y valor límite de SO ₂ según la normativa chilena.....	53
Figura 9.6. Ubicación de las ciudades de Copiapó y Tierra Amarilla (rojo con punto negro), de la fundición Hernán Videla Lira (rojo), de las centrales termoeléctricas (azul), de la mina La Candelaria (verde) y de las estaciones: C, LV, SF, Pai, TA y Pab (amarillo).	55
Figura 9.7. Concentraciones diarias de SO ₂ en las estaciones: C, LV, SF, Pai, Pab y TA.	56
Figura 9.8. Vista de la fundición Hernán Videla Lira. Fuente: SEREMI de Salud Atacama, 2011.	57
Figura 9.9. Vista de la fundición Hernán Videla Lira y sus alrededores.	60
Figura 9.10. Concentraciones anuales de SO ₂ en las estaciones C, LV, Pai, SF, Pab y TA y valor límite de SO ₂ según la normativa chilena.....	62
Figura 9.11. Ubicación del pueblo de Freirina y de la ciudad de Huasco (rojo con punto negro), del puerto de Huasco (barco azul), de las centrales termoeléctricas (azul) y de las estaciones: F, M, ME, SM1, SM2, SM3, SM4, SM5, SM6, SM7 y SM8 (amarillo).....	63
Figura 9.12. Concentraciones diarias de SO ₂ en las estaciones: F, M, SM1, SM2 y SM3.	64
Figura 9.13. Concentraciones diarias de SO ₂ en las estaciones: SM4, SM5, SM6, SM7 y SM8...	65

Figura 9.14. Ubicación de la ciudad de Huasco (rojo con punto negro), del puerto de Huasco (barco azul), de las centrales termoeléctricas (azul) y de las estaciones: F, M y SM1 (amarillo).	69
Figura 9.15. Ubicación de las centrales termoeléctricas (azul), de la estación ME (amarillo) y del puerto de Huasco (barco azul).	69
Figura 9.16. Concentraciones anuales de SO ₂ en las estaciones F, M, SM1, SM2, SM3, SM4, SM5, SM6, SM7 Y SM8 y valor límite de SO ₂ según la normativa chilena.	72
Figura 9.17. Ubicación de las centrales termoeléctricas (azul), de las estaciones M y F (amarillo), del puerto de Huasco (barco azul) y de la ciudad de Huasco (rojo con punto negro).	74
Figura 9.18. Concentraciones diarias de NO en las estaciones F y M.	75
Figura 9.19. Concentraciones anuales de NO en las estaciones F y M.	76
Figura 9.20. Concentraciones diarias de NO ₂ en las estaciones M y F.	76
Figura 9.21. Concentraciones anuales de NO ₂ en las estaciones F y M, y valor límite según la normativa chilena, de la EPA, de la UE y de la OMS.	77
Figura 9.22. Imagen satelital de Chañaral, tomada el 28 de marzo de 2015. Fuente: Grijalba, 2016.	79
Figura 9.23. Ubicación de las centrales termoeléctricas (azul), de las estaciones CS y LV (amarillo), de la fundición Hernán Videla Lira (rojo), de la mina a cielo abierto La Candelaria (verde), de la ciudades de Copiapó y Tierra Amarilla (rojo con punto negro).	80
Figura 9.24. Concentraciones diarias de PM ₁₀ en las estaciones CS y LV.	81
Figura 9.25. Concentraciones diarias de PM _{2.5} en la estación CS.	81
Figura 9.26. Imagen de la ciudad de Copiapó después del aluvión del 25 de marzo de 2015. Fuente: Griem, 2018.	84
Figura 9.27. Imagen de la ciudad de Copiapó después del aluvión del 25 de marzo de 2015. Fuente: SONAMI, 2016.	84
Figura 9.28. Concentraciones anuales de PM ₁₀ en la estaciones CS y LV de la provincia de Copiapó, y valores límites según las normativas.	86
Figura 9.29. Concentraciones anuales de PM _{2.5} en la estación CS de la provincia de Copiapó, y valores límites según las normativas.	87
Figura 9.30. Ubicación de las centrales termoeléctricas (azul), del puerto de Huasco (barco azul), de la ciudad de Huasco (rojo con punto negro) y de la estación HS (amarillo).	88
Figura 9.31. Concentraciones diarias de PM _{2.5} en la estación HS.	89
Figura 9.32. Concentraciones anuales de PM _{2.5} en la estación HS, y valores límites según la normativa chilena, de la EPA, de la UE y de la OMS.	91

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Ciudades de Chile y su concentración atmosférica de PM ₁₀ y PM _{2.5} para el año 2016. Fuente: OMS, 2016.....	12
Tabla 3.1. Provincias, comunas y principales asentamientos urbanos de la región de Atacama. Fuente: INE, 2017.....	15
Tabla 3.2. Precipitación promedio de la región de Atacama desde el año 1980 a 2010. Fuente: Santibáñez F. et al., 2016.	18
Tabla 3.3. Parámetros climáticos de la estación Caldera desde el año 2007 al 2009. Fuente: Arcadis, 2010.....	19
Tabla 3.4. Parámetros climáticos de la estación Tierra Amarilla desde el año 2007 al 2010. Fuente: Arcadis, 2010.....	19
Tabla 3.5. Centrales termoeléctricas en la región de Atacama.	25
Tabla 3.6. Parque de vehículos motorizados en la región de Atacama y en Chile, para el año 2016. Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Chile, 2017.....	26
Tabla 5.1. Estaciones en la región de Atacama. Fuente: SINCA, 2018. Elaboración propia.....	33
Tabla 5.2. Estaciones y los parámetros meteorológicos medidos. Fuente: SINCA, 2018. Elaboración propia.	34
Tabla 5.3. Estaciones y las técnicas de medición de SO ₂ utilizadas. Fuente: SINCA, 2018. Elaboración propia.	35
Tabla 5.4. Estaciones y las técnicas de medición de NO, NO ₂ y NO _x utilizadas. Fuente: SINCA, 2018. Elaboración propia.	35
Tabla 5.5. Estaciones y las técnicas de medición de PM ₁₀ y PM _{2.5} utilizadas. Fuente: SINCA, 2018. Elaboración propia.	36
Tabla 6.1. Normativa Chilena. Fuente: D.S. N° 113/02; D.S. N° 114/02; D.S. N° 59/98; D.S. N° 45/01 y D.S.N°12/11.....	37
Tabla 6.2. Normativa de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Fuente: NAAQS, 2015.....	38
Tabla 6.3. Normativa Europea. Fuente: European Union Law, 2008.....	39
Tabla 6.4. Umbrales de Alerta de la Normativa Europea. Fuente: European Union Law, 2008.	39
Tabla 6.5. Valores guías de la Organización Mundial de la Salud. Fuente: OMS, 2005.	40
Tabla 7.1. Validación de los datos disponibles desde el año 1993 al 2010 para SO ₂ en las estaciones Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando, Pabellón, Tierra Amarilla, CAP y Doña Inés. Elaboración propia.....	41
Tabla 7.2. Validación de los datos disponibles desde el año 2000 al 2018 para SO ₂ en las estaciones EME F, EME M, EME ME, SM1, SM2, SM3, SM4, SM5, SM6, SM7 y SM8. Elaboración propia.	41

Tabla 7.3. Validación de los datos disponibles desde el año 2003 al 2018 para NO en las estaciones EME F y EME M. Elaboración propia.	42
Tabla 7.4. Validación de los datos disponibles desde el año 2002 al 2018 para NO ₂ en las estaciones EME F y EME M. Elaboración propia.	42
Tabla 7.5. Validación de los datos disponibles desde el año 1999 al 2018 para PM ₁₀ en las estaciones Copiapó Sívica, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando, Tierra Amarilla, CAP, Doña Inés, EME F y EME M. Elaboración propia.	42
Tabla 7.6. Validación de los datos disponibles desde el año 2012 al 2018 para PM _{2.5} en las estaciones Copiapó Sívica, Huasco Sívica y EME F. Elaboración propia.	43
Tabla 8.1. Principales acciones del plan de descontaminación en la provincia de Copiapó. Fuente: CONAMA: Unidad de Planes y Normas, 2005.	45
Tabla 9.1. Rango, promedio y desviación estándar en las estaciones CAP y DI.	49
Tabla 9.2. Límites permisibles para el SO ₂ según el Reglamento Chileno sobre las Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo. Fuente: D.S. N° 594/99.	50
Tabla 9.3. Incidencias diarias desde el año 2001 al 2010 para el SO ₂ en la estación DI.	52
Tabla 9.4. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2008 y 2010 para el SO ₂ en la estación CAP.	52
Tabla 9.5. Rango, promedio y desviación estándar en las estaciones C, LV, SF, Pai, TA y Pab. ...	58
Tabla 9.6. Incidencias diarias desde el año 1993 al 2008 para el SO ₂ en la estación C.	60
Tabla 9.7. Incidencias diarias desde el año 1995 al 2006 para el SO ₂ en la estación LV.	60
Tabla 9.8. Incidencias diarias desde el año 1993 al 2009 para el SO ₂ en la estación SF.	61
Tabla 9.9. Incidencias diarias desde el año 1993 al 2009 para el SO ₂ en la estación Pai.	61
Tabla 9.10. Incidencias diarias desde el año al 1993 al 2009 para el SO ₂ en la estación TA.	61
Tabla 9.11. Incidencias diarias desde el año 1994 al 2009 para el SO ₂ en la estación Pab.	61
Tabla 9.12. Rango, promedio y desviación estándar en las estaciones F, M, SM1, SM2, SM3, SM4, SM5, SM6, SM7 y SM8.	67
Tabla 9.13. Incidencias diarias los años 2002, 2003, 2009 y 2010 para el SO ₂ en la estación F. 70	
Tabla 9.14. Incidencias diarias desde el año 2001 al 2006 y los años 2009 y 2010 para el SO ₂ en la estación M.	70
Tabla 9.15. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO ₂ en la estación SM1.	70
Tabla 9.16. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO ₂ en la estación SM2.	70
Tabla 9.17. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO ₂ en la estación SM3.	70
Tabla 9.18. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO ₂ en la estación SM4.	71
Tabla 9.19. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO ₂ en la estación SM5.	71
Tabla 9.20. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO ₂ en la estación SM6.	71

Tabla 9.21. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO ₂ en la estación SM7.	71
Tabla 9.22. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO ₂ en la estación SM8.	71
Tabla 9.23. Rango, promedio y desviación estándar en las estaciones F y M para NO.	75
Tabla 9.24. Rango, promedio y desviación estándar en las estaciones F y M para NO ₂	77
Tabla 9.25. Rango, promedio y desviación estándar en las estaciones CS y LV para PM ₁₀ y PM _{2.5}	83
Tabla 9.26. Incidencias diarias desde el año 2013 al 2018 para el PM ₁₀ en la estación CS.	85
Tabla 9.27. Incidencias diarias el año 2003 para el PM ₁₀ en la estación LV.	85
Tabla 9.28. Incidencias diarias desde el año 2013 al 2018 para el PM _{2.5} en la estación CS.	86
Tabla 9.29. Rango, promedio y desviación estándar en la estación HS para PM _{2.5}	90
Tabla 9.30. Rango, promedio y desviación estándar en la estación HS para PM _{2.5}	90

Resumen

La contaminación atmosférica es una problemática mundial y que por tanto Chile no está al margen de esta. En las zonas mineras las principales fuentes de contaminación son las fundiciones y las minas a cielo abierto, en los mayores centros urbanos la contaminación se debe al tráfico de vehículos y en las zonas más frías es también, producto de la calefacción en los hogares. Además de estas fuentes de contaminación, cabe destacar las termoeléctricas, los puertos y las chimeneas industriales.

La región de Atacama se caracteriza por ser una zona predominantemente minera con bajo nivel de población, por lo que sus principales fuentes de contaminación son las fundiciones, las minas a cielo abierto, las centrales termoeléctricas y los puertos.

El objetivo principal de este trabajo fue analizar la calidad del aire de la región de Atacama de Chile desde el año 1993 al 2018, a partir de la información obtenida en el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). Se consideraron los datos diarios de los siguientes contaminantes: dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de nitrógeno (NO) y material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$).

La metodología utilizada para este estudio se basó en el análisis de los datos de 21 estaciones de monitoreo de la calidad del aire, se dividió el análisis por contaminantes: dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_2 y NO) y material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$). Para el SO_2 y el material particulado se subdividió por provincias: Chañaral, Copiapó y Huasco. El análisis de los óxidos de nitrógeno se dividió en NO_2 y NO , ya que solo se cuentan con datos en la provincia de Huasco. Producto de la limitación de los datos públicos disponibles, el análisis fue realizado desde el año 1993 al 2010 para el SO_2 , desde el 2002 al 2010 para los NO_x y desde el 2002 al 2018 para el PM.

Se realizó una revisión bibliográfica del área de estudio, se validaron los datos disponibles para luego realizar el análisis a diferentes escalas temporales: diaria y anual. Se compararon las tendencias de los contaminantes con las normativas: chilena, de la Unión Europea (UE), de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y de la Organización Mundial de la Salud (OMS). De esta manera se obtuvieron las conclusiones del estado de la calidad del aire de la región de Atacama y se señalaron las recomendaciones pertinentes.

Para comprender el alcance de la contaminación atmosférica de la región de Atacama, esta se puede dividir en las tres provincias: Chañaral, Copiapó y Huasco. Del estudio, se comprobó que el SO_2 es el contaminante con los mayores niveles en la región, específicamente en la zona donde se instaló la fundición Potrerillos, las concentraciones promediaron $546 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Doña Inés (DI) y CAP, respectivamente. La fundición Potrerillos se ubica en la provincia de Chañaral, en una zona montañosa, aislada y por lo tanto acotada de contaminación por SO_2 . En la provincia de Copiapó, el estudio fue realizado en el Valle de Copiapó, las fuentes de contaminación son la fundición Hernán Videla Lira y la mina a cielo abierto La Candelaria. En esta provincia las concentraciones de SO_2 disminuyeron producto de la aplicación de un plan de descontaminación en la fundición, el material particulado tendió a aumentar el año 2015 producto de los aluviones de ese año, que dejaron material en suspensión. El promedio de las concentraciones de SO_2 están entre 12 y $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, las de PM_{10} entre 9 y $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el de $\text{PM}_{2.5}$ es de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la provincia de Huasco, que se encuentra en un valle en la zona costera, las

principales fuentes de emisiones son las centrales termoeléctricas y el puerto. Las concentraciones de SO₂, NO₂ y NO se han mantenido aproximadamente constantes en el tiempo y el PM aumentó durante el año 2015, también por los aluviones, pero luego disminuyó el año 2016, para mantenerse aproximadamente constante los años 2017 y 2018. Los promedios de las concentraciones de SO₂ van de 9 a 21 µg/m³, el promedio del NO₂ fue de 8,1 µg/m³, el del NO resultó en 5,1 µg/m³ y el de PM_{2.5} en 10 µg/m³.

1. Introducción

La contaminación atmosférica ha ido en aumento, producto del crecimiento acelerado de la población, la alta actividad industrial y las emisiones indiscriminadas; deteriorado la calidad del aire a nivel mundial.

La contaminación atmosférica se refiere a la presencia de una sustancia o un compuesto en el aire, que a ciertas concentraciones, causan daño a los seres humanos y al medioambiente. La relación de la contaminación atmosférica con problemas de salud a las personas, ha generado una creciente preocupación por parte de las autoridades, las cuales han establecido en las normativas los límites máximos permitidos para los distintos contaminantes.

La necesidad de establecer una red de estaciones de monitoreo permite llevar a cabo una evaluación de la calidad del aire de manera muy exhaustiva y precisa. Esto se utiliza para cumplir con la normativa legal y para gestionar y mejorar la calidad del aire, pues con esta información se pueden realizar políticas públicas tendientes a prevenir situaciones de contaminación y/o reducir las emisiones de contaminantes existentes, ya que la información entregada por esta red sirve de soporte técnico y científico. Además, los registros de esta red permiten hacer seguimiento a las medidas que son implementadas, verificando si producen el efecto esperado.

Chile cuenta con una normativa y con una red de monitoreo de la calidad del aire. En la página web del SINCA (Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire) está la información referente a la calidad del aire de todo el país; en este sitio web se encuentran las concentraciones de los contaminantes atmosféricos actualmente normados en Chile: SO_2 , NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO y O_3 .

Las principales fuentes de emisión de contaminantes en Chile son: transporte, actividades industriales y calefacción de viviendas. En la región de Atacama, zona estudiada, se considera que las principales fuentes son las minas a cielo abierto, las fundiciones, las centrales termoeléctricas y los puertos, de acuerdo a esto se monitorean las concentraciones de los siguientes contaminantes SO_2 , NO_2 , NO , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$. La red de la región cuenta con 21 estaciones, de las cuales 2 se ubican en la provincia de Chañaral, 7 en la provincia de Copiapó y 12 en la provincia de Huasco. Además de medir contaminantes, algunas de estas estaciones miden los siguientes parámetros meteorológicos: dirección y velocidad del viento, radiación global, presión atmosférica, precipitaciones, humedad relativa y temperatura ambiente.

La región de Atacama, históricamente ha tenido altos niveles de contaminación, especialmente de SO_2 y PM , pues en las áreas cercanas a las fundiciones de la provincia de Chañaral y de Copiapó fueron declaradas zonas saturadas por estos dos contaminantes y se les aplicaron planes de descontaminación. La provincia de Huasco fue declarada zona latente por PM_{10} y se ha establecido un plan de prevención de la contaminación atmosférica, producto de las emisiones de las centrales termoeléctricas y del puerto. Además, el año 2015 la región sufrió de aluviones, lo que produjo material en suspensión. Según lo anterior, es importante analizar la calidad del aire de la región de Atacama, compararla con la normativa vigente, determinar las causas de esta contaminación y señalar las recomendaciones pertinentes.

2. Planteamiento del Problema

La atmósfera es la masa gaseosa que rodea la tierra; está formada por aire y su cantidad y composición varía según la altura. La contaminación de la atmósfera se refiere a la presencia de sustancias, de origen natural y/o antrópico, que modifican su composición y pueden perjudicar al ser humano.

Chile se encuentra afectado por problemas de contaminación atmosférica; un estudio realizado por la OMS el año 2016 determinó que 27 de un total de 29 ciudades, presentan concentraciones medias anuales de PM_{10} por encima de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y sobre los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso de $PM_{2.5}$, tal y como se muestra en la tabla 2.1. Las concentraciones de PM_{10} están entre $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Huasco y Salamanca y $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Rancagua. Las concentraciones de $PM_{2.5}$ van desde los $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Iquique, Huasco y Salamanca a $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Osorno. En la región de Atacama, Copiapó se encuentra entre las 10 ciudades con mayor concentración de PM_{10} ($54 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabla 2.1. Ciudades de Chile y su concentración atmosférica de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para el año 2016.
Fuente: OMS, 2016.

N°	Ciudad	PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$PM_{2.5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	N°	Ciudad	PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$PM_{2.5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
1	Arica	23	11	16	Maule	35	20
2	Iquique	35	9	17	Linares	65	32
3	Copiapó	54	14	18	Chillán	40	26
4	Huasco	19	9	19	Tomé	37	16
5	Coquimbo	30	15	20	Talcahuano	56	25
6	Andacollo	37	18	21	Concepción	40	26
7	Salamanca	19	9	22	Chiguayante	30	11
8	Valparaíso	31	15	23	Coronel	32	18
9	Quilpué	38	22	24	Curanilahue	56	27
10	Viña del Mar	42	20	25	Los Ángeles	57	33
11	Santiago	67	29	26	Temuco	52	35
12	Rancagua	68	28	27	Valdivia	67	41
13	Rengo	35	17	28	Osorno	56	44
14	San Fernando	45	22	29	Puerto Montt	55	27
15	Curicó	47	28				

Las tres grandes fuentes de emisión de contaminantes en Chile son: transporte, actividades industriales y calefacción de viviendas. Existen planes y programas realizados por el Ministerio del Medio Ambiente para reducir la contaminación ambiental y mejorar la eficiencia energética. También se han incrementado el número de estaciones de monitoreo, se ha restringido la

circulación de los vehículos catalíticos con mayor antigüedad, se ha exigido un mayor control de emisiones por parte de las empresas encargadas de realizar la inspección técnica de vehículos (ITV), se han realizado recambios de calefactores y se han establecido normas de calidad y emisión para las principales fuentes industriales emisoras de contaminantes (termoeléctricas y fundiciones de cobre) (Instituto Nacional de Estadística, 2017). Asimismo, en la reforma tributaria de octubre 2014, se aprobó la aplicación de un impuesto que grava las emisiones al aire de material particulado (PM), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de carbono (CO_2) producidas por fuentes fijas conformadas por calderas o turbinas que posean una potencia térmica igual o superior a 50 MW_t (BCN, 2016).

En la región de Atacama, se han realizado normas de emisión de contaminantes para fuentes específicas, pues las principales fuentes en esta zona son las fundiciones de cobre y las termoeléctricas. Durante el año 2015 esta región fue la segunda con mayor cantidad (toneladas/año) de emisiones de SO_2 en el país (Instituto Nacional de Estadística, 2017).

2.1 Objetivo General

Este trabajo tiene como razón principal analizar la calidad del aire de la región de Atacama desde el año 1993 al 2018, para lo cual se han usado datos obtenidos del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) de los principales contaminantes atmosféricos medidos en dicha zona.

2.2 Objetivos específicos

Además, se tiene en consideración los siguientes objetivos específicos:

- Validar los datos en las diferentes estaciones meteorológicas y de calidad del aire en la región de Atacama.
- Analizar la concentración en las escalas de espacio y tiempo de los siguientes contaminantes: SO_2 , NO_2 , NO , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$.
- Comparar los resultados obtenidos con las siguientes normativas: chilena, UE, EPA y OMS.
- Analizar las posibles causas de contaminación y señalar las recomendaciones pertinentes.

3. Área de estudio

La región de Atacama está ubicada en el norte de Chile, su capital es Copiapó, y como se muestra en la figura 3.1, limita al norte con la región de Antofagasta, al este con Argentina, al sur con la región de Coquimbo y al oeste con el océano Pacífico. Está dividida en tres provincias: Chañaral (capital: Chañaral), Copiapó (capital: Copiapó) y Huasco (capital: Vallenar); y nueve comunas (Chañaral, Diego de Almagro, Copiapó, Caldera, Tierra Amarilla, Alto del Carmen, Huasco, Freirina y Vallenar) (SEA, 2018).

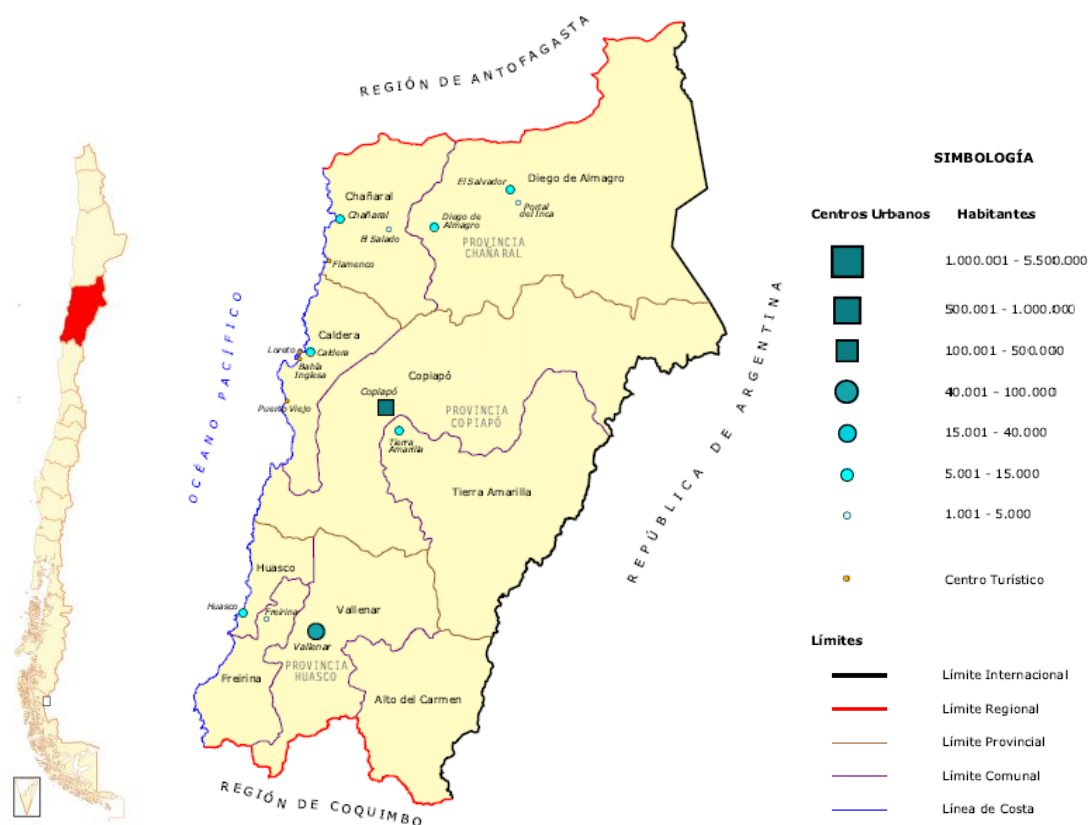


Figura 3.1. Ubicación de la región de Atacama.

Según el último censo realizado el año 2017, la región cuenta con 286.168 habitantes (INE, 2017) equivalentes al 1,6% respecto al total nacional, siendo la cuarta región menos poblada del país. Cuenta con una extensión de 74.806 km², equivalentes al 9,9% del territorio nacional, convirtiéndose así en la cuarta región más extensa del país (BCN, 2018).

En la figura 3.2 se indican los principales asentamientos urbanos a nivel espacial y en la tabla 3.1 se resumen las provincias de la región de Atacama, las comunas, la población en cada una de ellas, la superficie y las principales ciudades. De lo anterior se desprende que la ciudad de Copiapó tiene 153.937 habitantes, lo que corresponde al 54% del total regional, convirtiéndose en la ciudad más concentrada de habitantes; le sigue la ciudad de Vallenar con 51.917 habitantes, correspondiente al 18%. Ambas ciudades concentran el 72% de la población regional y las otras ciudades señaladas contribuyen con menos del 6% cada una.



Figura 3.2. Región de Atacama y sus principales asentamientos urbanos. Elaboración propia.

Tabla 3.1. Provincias, comunas y principales asentamientos urbanos de la región de Atacama.
Fuente: INE, 2017.

Provincia	Comuna	Población [habitantes]	Superficie [km ²]	Ciudad
Chañaral	Diego de Almagro	13.925	18.664,0	Diego de Almagro
				El Salvador
	Chañaral	12.219	5.772,0	Chañaral
Copiapó	Copiapó	153.937	16.681,0	Copiapó
	Caldera	17.662	4.666,6	Caldera
	Tierra Amarilla	14.019	11.191,0	Tierra Amarilla
Huasco	Vallenar	51.917	7.084,0	Vallenar
	Huasco	10.149	1.601,4	Huasco
	Freirina	7.041	3.207,0	Freirina
	Alto del Carmen	5.299	5.939,0	Alto del Carmen
Total:		286.168	74.806,0	

3.1 Características Geográficas

En Chile las formas predominantes del relieve son: la Cordillera de los Andes, la Depresión Intermedia, la Cordillera de la Costa y las planicies litorales. La región de Atacama no presenta las unidades tradicionales de Chile, pues su relieve es muy irregular y accidentado; las características geográficas dominantes son la Cordillera de los Andes, los valles transversales y la Costa:

- Cordillera de los Andes: conserva sus características y destaca la cumbre más alta del país: Ojos del Salado con 6.893 msnm, además está el Nevado de Tres Cruces (6.748 msnm), el Incahuasi (6.621 msnm), el Ermitaño (6.146 msnm) y el Nevado San Francisco (6.018 msnm).
- Depresión Intermedia: es sustituida por los valles transversales, en donde se da la actividad agrícola, gracias a las escasas aguas fluviales. Importante es destacar la presencia del desierto; en donde en ocasiones, producto de las inusuales lluvias se transforma en un Desierto Florido.
- Cordillera de la Costa: es discontinúa y su altura disminuye en esta región, debido a la presencia de los valles transversales y por la erosión marina.
- Planicies litorales: es amplia y pareja en Atacama y se confunden con la Cordillera de la Costa. Cuenta con un litoral de más de 500 km, en donde hay playas y sectores de costa; especialmente en la provincia de Chañaral.

Los principales ríos de la región son el Copiapó y el Huasco, los cuales nacen en las altas cumbres andinas y son el producto de los deshielos de verano y las lluvias de invierno. El primero posee una cuenca hidrográfica de 18.400 km² y una longitud de 162 km. El segundo tiene una cuenca hidrográfica de 9.850 km² y se ubica hacia el sur (SERNATUR, 2015). La región cuenta con dos embalses: Tranque Lautaro en el valle de Copiapó y Santa Juana en el valle de Huasco, con capacidades de 37 millones de m³ y 160 millones de m³, respectivamente (Comité Nacional Chileno de Grandes Presas, 2018). Estos embalses permiten regular los caudales de los ríos mencionados anteriormente. Además, Atacama cuenta con aguas subterráneas, especialmente en el Valle del Río Copiapó, las cuales son utilizadas principalmente para fines de regadío y mineros (SERNATUR, 2015).

3.2 Clima

El clima de la región de Atacama se debe principalmente al Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS) que bloquea la llegada de frentes climáticos, a la corriente fría de Humboldt, y que sumados a la compleja topografía conlleva a escasas y concentradas precipitaciones en algunos días de la época invernal; por esta razón la región es semiárida y predomina el clima desértico (Squeo et al., 2008). Las precipitaciones aumentan a medida que se avanza al sur o de oeste a este; lo que atenúa el desierto. En la región destacan cuatro subclimas (BCN, 2018; ODEPA, 2018 y SERNATUR, 2015):

- Clima desértico litoral: se produce en la costa de la región y se caracteriza por la abundante nubosidad matinal. Las precipitaciones aumentan hacia el sur alcanzando los 18 mm anuales y la humedad relativa está en torno al 70%.

- Clima desértico de interior: se da en la franja intermedia de la región, especialmente en las pampas. Se caracteriza por elevadas temperaturas durante el día, ausencia de nubosidad y precipitaciones.
- Clima desértico marginal: se desarrolla desde el sur del valle de Copiapó hasta el límite meridional de la región. Se produce una mayor cantidad de precipitaciones anuales, si se compara con los dos tipos de climas anteriores, especialmente en el sur de la región. La humedad tiende a desaparecer al ingresar al interior de los valles y el desierto está un poco más atenuado, por lo que se le denomina a esta zona semi-desierto.
- Clima desértico marginal de altura: se localiza por sobre los 2.000 metros de altitud. Las precipitaciones son más abundantes que en los otros tres climas mencionados (250 mm anuales) y en las zonas más altas predominan las precipitaciones sólidas. Las temperaturas son bajas y hay una marcada oscilación térmica entre el día y la noche.

3.3 Vegetación

La vegetación es escasa en toda la región y con diferencias entre las distintas zonas. La costa norte se caracteriza por la existencia de especies adaptadas a condiciones semidesérticas: cactáceas, arbustos y hierbas. El sur, en general, se caracteriza por matorral costero de arbustos (BCN, 2018).

3.4 Precipitación

Las lluvias son escasas en la región, aunque aumentan hacia el interior y se presentan principalmente en los meses de mayo a agosto tal y como se muestra en la figura 3.3.

En la tabla 3.2 se indica que la precipitación anual promedio entre los años 1980 a 2010 fue de 40,6 mm. El valor más bajo durante estos años fue de 19,9 mm y el más alto de 65,9 mm (Santibáñez F. et al., 2016).

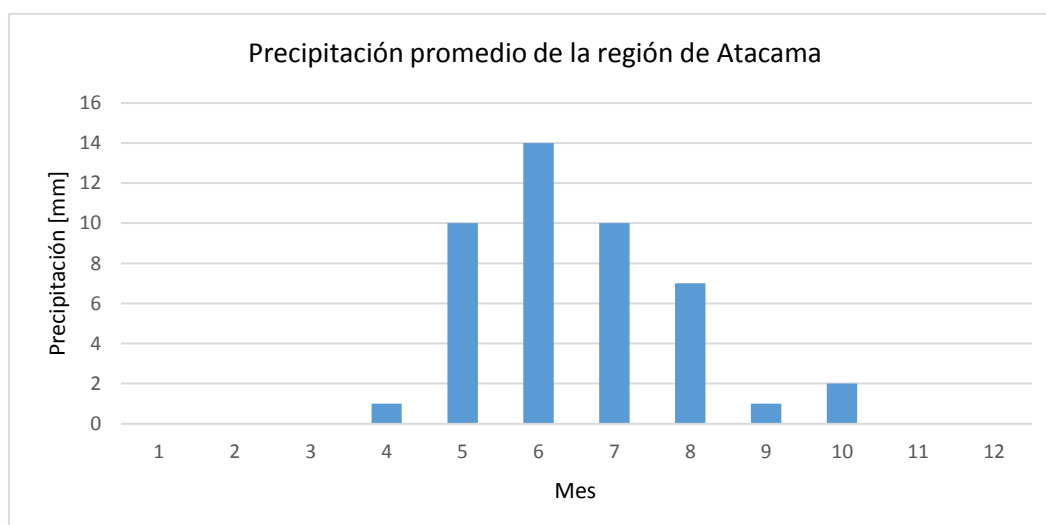


Figura 3.3. Precipitaciones promedio de la región de Atacama desde los meses de enero a diciembre. Fuente: Climate data, 2018.

Tabla 3.2. Precipitación promedio de la región de Atacama desde el año 1980 a 2010. Fuente: Santibáñez F. et al., 2016.

Parámetro	Abreviatura	Valores [mm]
Precipitación normal anual	PPA	40,6
Precipitación anual más baja	PPA _{min}	19,9
Precipitación anual más alta	PPA _{máx}	65,9

3.5 Temperatura

Las temperaturas en la región son variables, pero en general los días son calurosos y las noches frías. En la época estival se llega a los 28 o 32°C, superando los 35°C en ocasiones. En esta misma época, durante la noche, las temperaturas descienden están en torno a los 17°C.

En invierno, específicamente por las noches, las mínimas están entre 0 a 5°C y las máximas que se registran durante el día alcanzan los 20 a 25°C.

En la figura 3.4 se grafican los valores promedio, las máximas y las mínimas de temperatura para la región de Atacama. Las máximas están cercanas a los 30°C durante el verano (diciembre, enero y febrero) y las mínimas descienden hasta los 8°C en los meses de junio, julio y agosto, correspondientes al invierno Chileno.

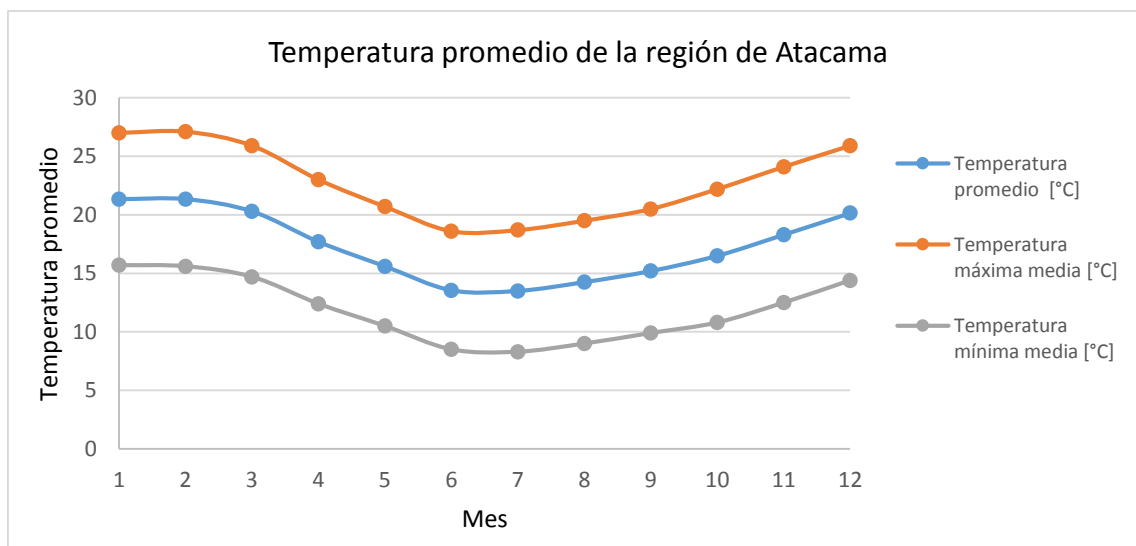


Figura 3.4. Promedios, máximas y mínimas de temperaturas en la región de Atacama desde enero a diciembre. Fuente: Climate data, 2018.

3.6 Radiación Solar

En la tabla 3.3 se señalan los parámetros climáticos mensuales registrados en la estación Caldera (véase su localización en la figura 3.2.) durante el período comprendido entre los años 2007 al

2009. En esta estación costera, la radiación solar presenta valores que van desde 113 W/m² en junio a 287 W/m² en enero.

Tabla 3.3. Parámetros climáticos de la estación Caldera desde el año 2007 al 2009. Fuente: Arcadis, 2010.

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
T. media mensual (°C)	19,0	19,1	18,0	16,3	14,4	12,5	12,3	12,5	12,9	14,1	15,6	16,6	15,3
T. Máx (°C)	23,5	23,0	22,4	20,6	18,1	17,6	16,9	16,6	17,0	18,2	21,7	20,5	19,7
T. Mín (°C)	15,3	15,3	13,0	12,5	10,6	7,2	7,0	7,9	8,2	9,9	12,1	13,6	11,1
Precipitaciones (mm)	0,0	0,3	0,0	0,2	0,1	0,3	4,3	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,5
Evapotranspiración (mm)	265	227	209	154	116	101	120	140	170	208	214	244	181
Hum. Relativa (%)	81,6	81,4	81,0	80,0	82,7	84,8	83,5	84,2	82,9	82,1	78,4	81,7	82,0
Vel. Viento (m/s)	3,7	4,0	3,5	3,3	3,2	3,5	3,6	3,9	4,1	3,8	3,8	3,9	3,7
Radiación (W/m ²)	287	281	247	163	125	113	129	158	170	223	247	276	202

En la tabla 3.4 se indican los parámetros climáticos mensuales registrados en la estación Tierra Amarilla (véase su localización en la figura 3.2.), durante el período comprendido entre los años 2007 al 2010. En esta estación, ubicada en el Valle de Atacama, la radiación presenta valores que van desde 293 W/m², en los meses de junio y julio a 612 W/m², en diciembre y enero.

Según lo anterior, la radiación solar en la región de Atacama depende de la zona, pues en el valle los valores son superiores que en la costa. También es importante destacar que para ambas estaciones los valores máximos y mínimos se presentan en la época estival e invernal, respectivamente.

Tabla 3.4. Parámetros climáticos de la estación Tierra Amarilla desde el año 2007 al 2010. Fuente: Arcadis, 2010.

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
T. media mensual (°C)	21,2	21,3	19,9	17,4	15,6	13,3	12,4	14,2	14,9	16,7	18,8	19,4	17,1
T. Máx (°C)	31,3	31,4	30,2	27,0	24,5	23,8	23,0	24,0	25,5	26,9	29,2	29,8	27,2
T. Mín (°C)	13,9	14,1	12,9	10,8	9,4	5,6	3,8	6,9	7,6	9,1	10,8	12,2	9,8
Precipitaciones (mm)	0,0	0,0	0,0	0,9	1,8	5,6	3,8	3,2	1,8	0,4	0,3	0,1	1,5
Evapotranspiración (mm)	174	141	117	78	54	40	43	59	79	110	133	167	100
Hum. Relativa (%)	58,5	58,5	62,5	66,5	67,0	61,0	57,0	62,0	58,0	61,0	57,0	60,0	60,8
Vel. Viento (m/s)	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,8	1,8	2	2,3	2,5	2,7	2,8	2,3
Radiación (W/m ²)	612	570	495	410	335	293	293	335	410	495	570	612	453

De las tablas 3.3 y 3.4, también se pueden considerar otros parámetros, como la evapotranspiración y la humedad relativa. En relación a la evapotranspiración, en la estación Caldera, anualmente se disipan 181 mm de agua; siendo los meses de diciembre, enero y febrero donde se evapora la mayor cantidad de agua (244, 265 y 227 mm, respectivamente), esto producto de las altas temperaturas estivales. Los meses de mayo a julio presentan los valores más bajos (116, 101 y 120 mm, respectivamente), lo que coincide con el final del otoño y principio del invierno, época más fría.

La humedad relativa promedio anual en esta estación es del 82,0%; se mantiene relativamente constante en el año, con un máximo del 84,8% en junio y un mínimo del 78,4% en noviembre.

Para el caso de la estación Tierra Amarilla, representativa del valle de Copiapó, la evapotranspiración anual promedio es de 100 mm de agua, y al igual que la estación Caldera, la mayor cantidad de agua disipada se produce en la época estival con un máximo de 174 mm en enero. Los valores mínimos se producen en junio y julio, o sea en invierno.

La humedad promedio anual en la estación Tierra Amarilla es del 60,8%. Las fluctuaciones durante el año son mayores que en la estación Caldera. El valor más alto es del 67%, verificándose en mayo y el valor más bajo es del 57% en los meses de julio y noviembre.

Por lo anterior, la evapotranspiración en ambas estaciones es más alta durante el período estival, esto debido a las mayores temperaturas que producen la evaporación del agua. Además, se produce una mayor evapotranspiración en la costa que en el valle, producto del mayor contenido de agua o sea a la mayor humedad relativa que existe en las zonas costeras.

3.7 Viento

Las rosas de los vientos están representadas en la figura 3.5; estas fueron realizadas a partir de los datos obtenidos de las estaciones Caldera y Tierra Amarilla. En estas se indican las velocidades del viento en m/s y el porcentaje en términos anuales cuando el viento sopla a una determinada dirección y velocidad.

En la estación Caldera el viento sopla con mayor frecuencia de tiempo en las direcciones Sur-suroeste, suroeste, oeste-suroeste y oeste. También existe viento en las demás direcciones, pero con frecuencias mucho más bajas que las mencionadas anteriormente.

Las velocidades están mayoritariamente entre 4 y 8 m/s (14,4 y 28,8 km/h) y muy pocas veces al año la velocidad del viento supera los 10 m/s (36 km/h). En cuanto a la estación Tierra Amarilla, mayoritariamente el viento sopla en dirección norte, lo que comprende aproximadamente el 40% del tiempo. Igualmente se producen vientos desde la dirección noreste, representado el 30% y con una frecuencia del 12% del tiempo en dirección sur. Las velocidades están mayoritariamente entre 3 y 8 m/s (10,8 y 28,8 km/h).

Se indican estas dos rosas de vientos, ya que la estación Caldera está emplazada en una zona costera; en cambio la estación Tierra Amarilla se encuentra ubicada en el valle. Para ambos casos la dirección del viento es baja, pues se encuentra mayoritariamente entre los 3 y 8 m/s (10,8 y 28,8 km/h), por lo que la dispersión de contaminantes también debería ser baja.

En las tablas 3.3 y 3.4 se confirma lo indicado anteriormente, que las velocidades del viento en la región son bajas, aunque es más baja en el valle que en la zona costera.

En la estación Caldera (tabla 3.3) la velocidad más baja corresponde a 3,2 m/s (11,5 km/h) y se produjo en otoño, específicamente en el mes de mayo. La más alta resultó de 4,1 m/s (14,8 km/h) y se verificó en primavera, en el mes de septiembre. En general, no hay grandes fluctuaciones durante el año y el promedio anual estuvo en 3,7 m/s (13,3 km/h) para los años comprendidos entre el 2007 y el 2009.

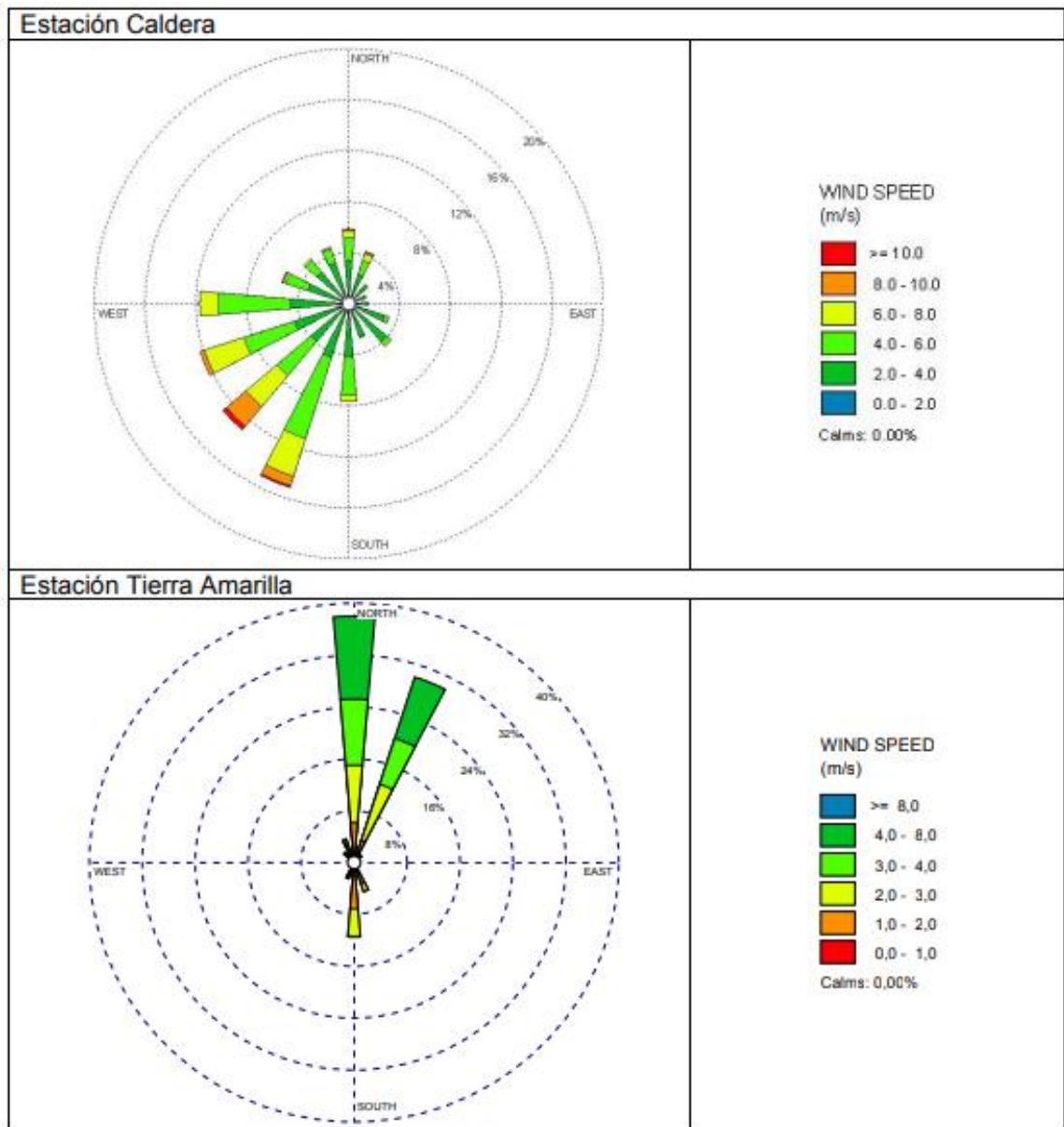


Figura 3.5. Rosa de vientos (%) de las estaciones Caldera (2007-2009) y Tierra Amarilla (2007-2010). Fuente: Arcadis, 2010.

3.8 Actividades económicas

En el año 2015 la región de Atacama aportó un 2,4% del PIB (Producto Interior Bruto) nacional, lo que equivale a \$3.491 mil millones de pesos (ODEPA, 2018). Entre las principales actividades económicas de la región destacan la minería y la agricultura. La primera es la base de la

economía regional, asociada principalmente al cobre, pero también se explotan en menor medida hierro y metales preciosos como el oro y la plata.

En la figura 3.6 y 3.7 se indican las principales mineras localizadas en la región, las cuales están más concentradas en la provincia de Copiapó. Importante es destacar que la mayoría de las minas están asociada al mineral de cobre y que la explotación minera se lleva a cabo tanto a cielo abierto como de manera subterránea. En la figura 3.6 se visualizan las minas subterráneas, las cuales son: Alcaparrosa (cobre), Carola (cobre, oro y plata), Caserones (cobre y molibdeno), Ojos del Salado (cobre y oro), Atacama Kozán (cobre, oro y plata), Punta del Cobre (cobre), Mantos del Cobre (cobre) y Granate (cobre). En cuanto a las minas a cielo abierto, destacan las visualizadas en la figura 3.7: Minera Candelaria (cobre, oro y plata), La Coipa (oro y plata), Maricunga (oro), Caserones (cobre y molibdeno), Mantos Verdes (cobre) y Los Colorados (hierro). La Minera El Salvador (cobre y molibdeno) es explotada tanto a cielo abierto como de manera subterránea. Según lo anterior, en número son más las mineras subterráneas, pero la que produce mayor cantidad de cobre es a cielo abierto y corresponde a la Minera La Candelaria, la cual el año 2016 produjo un total de 135,4 miles de toneladas métricas de cobre (SERNAGEOMIN, 2017).

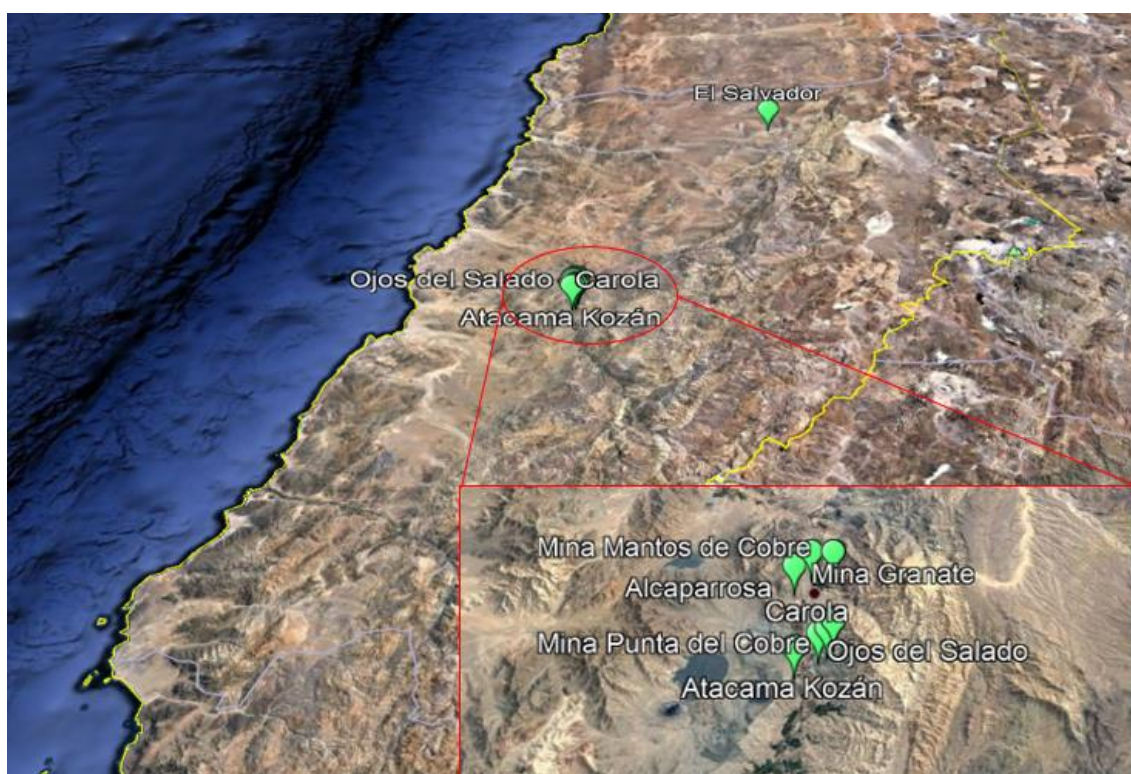


Figura 3.6. Mineras subterráneas localizadas en la región de Atacama. Elaboración propia.



Figura 3.7. Mineras a cielo abierto localizadas en la región de Atacama. Elaboración propia.

El Censo Agropecuario y Forestal del año 2007 indica que la región de Atacama dedica al sector agrícola 19.734,7 hectáreas, lo que corresponde al 0,4% de la superficie nacional destinada a este uso.

El uso principal del suelo son las especies frutales (67,4% de las 19.734,7 hectáreas regionales), luego le siguen las plantas forrajeras (11,5%) y finalmente las hortalizas (8,4%). En relación al país, el único grupo que destaca es el de frutales, cuya superficie alcanza el 4,3% del total nacional.

Las plantaciones más significativas corresponden al de uva de mesa y olivo. La uva de mesa se cultiva mayoritariamente en la zona alta de los valles, principalmente en las provincias de Copiapó (comunas de Tierra Amarilla y Copiapó) y de Huasco (Alto del Carmen). El olivo se cultiva fundamentalmente en la provincia de Copiapó (comunas de Copiapó y Caldera) y provincia de Huasco (Huasco y Freirina) (SEA, 2018; ODEPA, 2018 y BCN, 2018).

La mayoría de las industrias en la región están relacionada a la minería. La fundición Potrerillos (véase la figura 3.8), propiedad de la empresa estatal Codelco, se localiza en Potrerillos (antigua localidad minera), trabaja actualmente con gasóleo y tiene una capacidad de producción de 320 kilotoneladas al año de cobre (Codelco, 2017 y Pérez, 2017). La fundición Hernán Videla Lira o fundición Paipote (véase la figura 3.8), propiedad de la empresa estatal ENAMI, se encuentra cercana a la ciudad de Tierra Amarilla, en donde se concentran el mayor número de mineras.

Esta fundición cuenta con una capacidad de 640 kt/año y también funciona con gasóleo (ENAMI, 2017 y Pérez, 2017). Ambas suman un 960 kilotoneladas al año de cobre.

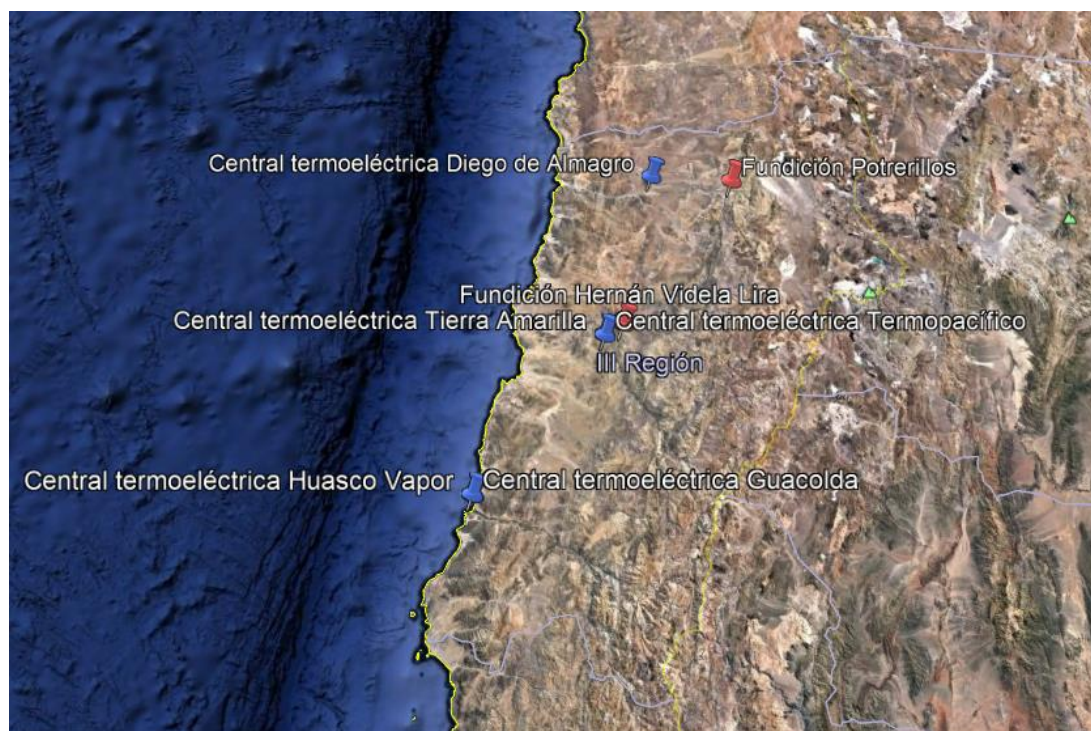


Figura 3.8. Ubicación de fundiciones y termoeléctricas. Elaboración propia.

La energía eléctrica se produce fundamentalmente mediante centrales termoeléctricas y son complementadas con centrales hidroeléctricas. Sin embargo, actualmente la región es líder en proyectos de energía renovables, con parques eólicos y solares (SEA, 2018 y BCN, 2018).

En la tabla 3.8 se indican las centrales termoeléctricas, la ubicación, la capacidad y el tipo de combustible utilizado. Las centrales termoeléctricas que funcionan a gas natural son (3): Tierra Amarilla (144 MW), Termopacífico (87 MW), San Lorenzo (56 MW) y Cenizas (16 MW), las cuatro suman 303 MW. Las que utilizan carbón son: Guacolda (760 MW) y Huasco Vapor (16 MW), ambas suman 776 MW de potencia. Finalmente, las que funcionan a gasóleo son: Diego de Almagro (24 MW) y Huasco TG (64 MW) y la suma resulta de 88 MW. Por lo tanto, el combustible que más se utiliza es el carbón, luego le sigue el gas y finalmente el gasóleo (Central Energía, 2018 y Generadoras de Chile, 2018).

Tal y como se indica en la tabla 3.5, la central con mayor capacidad es Guacolda, con el 65,1% de la potencia de la región, le sigue la central Tierra Amarilla con el 12,3%. Por consiguiente, la mayor central termoeléctrica se ubica en la provincia de Huasco y funciona a carbón.

Tabla 3.5. Centrales termoeléctricas en la región de Atacama.

Central termoeléctrica	Provincia	Capacidad [MW]	%	Tipo de combustible
Termopacífico	Copiapó	87	7,5	Gas natural
Tierra Amarilla		144	12,3	Gas natural
Cenizas		16	1,4	Gas natural
Huasco Vapor	Huasco	16	1,4	Carbón
Guacolda		760	65,1	Carbón
Huasco TG		64	5,5	Gasóleo
Diego de Almagro	Chañaral	24	2,0	Gasóleo
San Lorenzo		56	4,8	Gasóleo
Total:		1.167	100	

Los puertos en la región son tres (véase la figura 3.9): Huasco, Caldera y Chañaral; en ese orden de relevancia, ya que Huasco movilizó 10.989.605 toneladas métricas durante el año 2016, equivalentes al 7,6% del total nacional, Caldera 7.216.070 toneladas métricas, correspondientes al 5%, y Chañaral 656.367 toneladas métricas, igual al 0,5%. El total regional es de 18.862.041 toneladas métricas (13% del total nacional). El tonelaje que se mueve en Huasco y Caldera no es depreciable si se compara con los principales puertos Chilenos como es el caso de San Vicente que movilizó 17.285.754 toneladas métricas (11,9% del total nacional) durante el año 2016 o San Antonio con 14.201.098 toneladas métricas (9,8% del total nacional) y Quintero con 13.796.324 (9,5% del total nacional) (Directemar, 2017).

En los puertos se han desarrollado las industrias del aceite y de la harina de pescado. Asimismo, existen cultivos marinos principalmente de ostiones en las bahías Inglesa, Salado y Flamenco, ubicadas en la provincia de Copiapó.

Por último, la región cuenta con plantas agroindustriales, en donde se elabora pisco, producto producido a base de uvas cultivadas en los valles. Además, en Huasco hay industrias que producen aceite de oliva y también se preparan aceitunas en conserva.



Figura 3.9. Ubicación de los puertos de la región de Atacama. Elaboración propia.

3.9 Parque vehicular:

Los vehículos son otra fuente emisora de contaminación; producto de que los motores de combustión interna emiten óxidos nitrosos (NOx), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), compuestos orgánicos volátiles (COV) y material particulado (PM) (Instituto Nacional de Estadística de Chile, 2017).

En la tabla 3.6 se indica el número de vehículos en el año 2016 para la región de Atacama y a nivel nacional. Se agrupa en catalíticos, ecológico, eléctricos y gas y no catalítico. Al observar dicha tabla, se puede concluir que el parque vehicular no aporta grandes cantidades de contaminantes, pues cuenta con 91.523 de vehículos, equivalentes al 2% del total nacional y de estos solamente 4.754 son no catalíticos.

Tabla 3.6. Parque de vehículos motorizados en la región de Atacama y en Chile, para el año 2016. Fuente: Instituto Nacional de Estadística de Chile, 2017.

Región	Vehículos (número)		Total	%
	Catalíticos, ecológico, eléctricos y gas	No catalítico		
Atacama	86.769	4.754	91.523	2
Total Chile	4.612.350	241.063	4.853.413	100

Esta revisión, que incluye las características geográficas, el clima, la vegetación, las precipitaciones, las temperaturas, la radiación solar, el viento, las actividades económicas y el

parque vehicular de la región de Atacama se centra principalmente en los siguientes elementos, ya que podrían incidir en la calidad del aire:

- | | |
|------------------------------|---|
| - Actividad minera: | - Minas a cielo abierto de cobre, oro, plata, hierro y molibdeno
- Fundiciones |
| - Centrales termoeléctricas: | - Gas natural
- Carbón
- Gasóleo |
| - Ciudades: | - Copiapó, Vallenar, Caldera, Chañaral, El Salvador, Tierra Amarilla, Diego de Almagro y Huasco |
| - Puertos | - Caldera
- Chañaral
- Huasco |

En relación a la actividad minera, las minas que afectan la calidad del aire son las explotadas a cielo abierto, porque son fuente de emisión de material particulado. Existen 7 mineras explotadas de esta manera (véase la figura 3.7) y son las más grandes de la región. La Minera Candelaria produjo 135,4 miles de toneladas métricas de cobre durante el año 2016, le sigue la Minera Caserones con 101,7 miles de toneladas métricas de cobre y 1.087 miles de toneladas métricas de molibdeno para el mismo año, luego está la Minera El Salvador con una producción de 59,8 miles de toneladas métricas de cobre y 901 miles de toneladas métricas de molibdeno; para el caso de El Salvador, la producción mencionada anteriormente corresponde tanto a la producción subterráneas como a cielo abierto.

Sobre la actividad minera, también destacan las 2 fundiciones, ya que estas incide en la calidad del aire, pues pueden emitir los siguientes contaminantes: SO_2 , PM, arsénico (As), mercurio (Hg), plomo (Pb) y cadmio (Cd). La fundición Paipote y la fundición Potrerillos producen un total de 960 kilotoneladas de cobre al año y funcionan con gasóleo. Además, la primera dispone de dos plantas de ácido sulfúrico, las que producen del orden de 285.000 toneladas por año.

Las centrales termoeléctricas que se localizan en la región son: Termopacífico, Tierra Amarilla, Cenizas, Huasco Vapor, Guacolda, Huasco TG, Diego de Almagro y San Lorenzo. La capacidad total es de 1.167 MW. Todas las que se encuentran en la provincia de Chañaral funcionan con gasóleo y suman 80 MW, las centrales de la provincia de Copiapó funcionan con gas natural y suman 247 MW. La de mayor capacidad es Guacolda, se ubica en la provincia de Huasco, tiene una capacidad de 760 MW, funciona en base a carbón y genera el 65% de los MW de la región. En esta provincia también existen otras 2 centrales, pero de menor envergadura; la suma de estas tres resulta en 840 MW.

Por lo tanto, es en la provincia de Huasco donde se genera la mayor contaminación producto de las centrales termoeléctricas, los contaminantes emitidos son: PM, SO_2 , NO_x , CO (monóxido de

carbón) y COV. El combustible que mayores contaminantes emite es el carbón, luego le sigue el gasóleo y al final el gas natural. Por todo lo anterior, la central termoeléctrica Guacolda es la que reviste mayor atención, por los contaminantes emitidos y sus concentraciones.

En la región, los asentamientos urbanos son ciudades pequeñas, existiendo muchos pueblos y aldeas. La ciudad más grande es Copiapó, concentrando más del 50% de la población total; a pesar de esto, su población es de 153.937 habitantes, un número bajo, por lo que no se considera a las ciudades como un elemento que puede afectar notoriamente la calidad del aire.

Por último, están los puertos de: Guacolda, Calderilla y Barquito que en total mueven 18.862.041 toneladas métricas durante el año (13% del total nacional). Guacolda (10.989.605 t/año) y Calderilla (7.216.070 t/año) son los que más toneladas movilizan, por lo que se debe prestar atención a las áreas cercanas, ya que estos puertos son fuentes de contaminación atmosférica.

4. Contaminación Atmosférica

En el presente estudio se analiza la calidad del aire de la región de Atacama, por lo que se hace necesario definir la contaminación atmosférica en términos generales, considerando a continuación las definiciones establecidas por la OMS, por la EU y por Chile.

La contaminación atmosférica es definida por la OMS como *“la contaminación del medio ambiente interior o exterior por cualquier agente químico, físico o biológico que modifique las características naturales de la atmósfera, las cuales pueden causar problemas respiratorios y otras enfermedades que pueden ser fatales.”* (WHO, 2017)

La Unión Europea en la Directiva Europea 2008/50/CE define contaminante atmosférico como *“toda sustancia presente en el aire ambiente que pueda tener efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente en su conjunto”*.

En Chile, la ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente define contaminación como *“la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente.”*

Tanto la definición de la OMS como de la UE concuerdan que la contaminación atmosférica tiene efectos nocivos en la salud y por eso la importancia de mitigar. En cambio, en Chile solo se refiere a la presencia de sustancias en concentraciones superiores o inferiores a la ley vigente, no haciendo referencia a la salud de las personas y menos al medio ambiente.

4.1. Fuentes de contaminación

Existen distintas fuentes de contaminación atmosférica, las cuales se clasifican en naturales y antropogénicas.

- Fuentes naturales: Son producto de la emisión de contaminantes, sin intervención humana. Ejemplos de este tipo son las erupciones volcánicas, que emiten principalmente dióxido de azufre (SO₂), metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), las corrientes de aire, que arrastran partículas en suspensión especialmente en las zonas

más secas, y los incendios forestales de origen natural, pues emiten cenizas, partículas y monóxido de carbono (CO). Finalmente, la vegetación y los animales que también son capaces de emitir dióxido y monóxido de carbono.

- Fuentes antropogénicas: Referidas a la actividad humana como el transporte, la agricultura, la minería y la industria. Estas fuentes de contaminación, a su vez se clasifican en:

- Fuentes Fijas: Instalaciones industriales, construcción, mineras, generación de energía, generación de residuos municipales, agricultura.

- Fuentes Móviles: Transporte.

4.2. Principales Contaminantes Atmosférico

Existen dos tipos de contaminantes atmosféricos: primarios y secundarios.

- Contaminantes primarios: Son emitidos directamente a la atmósfera debido a procesos naturales o antropogénicos. Ejemplos comunes son el monóxido y el dióxido de carbono, los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el material particulado.

- Contaminantes secundarios: Se forman cuando ciertos contaminantes primarios sufren reacciones químicas en la atmósfera, interaccionando con componentes normales de esta o bien con otro contaminante primario. Ejemplos de este tipo son el ozono (O₃), el peroxiacetilnitrato (PAN) y el ácido sulfúrico (H₂SO₄).

Según la OMS (WHO, 2018), los principales contaminantes atmosféricos son: el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) y el ozono. Tanto la OMS como la EPA, la UE y países como Chile fijan concentraciones límites para estas sustancias y así las personas y el medioambiente no se vean afectadas negativamente.

En este trabajo se analizan los siguientes contaminantes: SO₂, NO₂, NO, PM₁₀ y PM_{2.5}, ya que solo se cuentan con esos datos.

4.2.1 Dióxido de Azufre (SO₂)

Es un gas incoloro y con un olor penetrante. Su principal fuente de emisión antropogénica se asocia a los procesos de combustión en calefacciones domésticas, centrales térmicas, calderas, incineradoras y tráfico de vehículo. También se produce al fundir menas que contienen azufre.

El SO₂ puede provocar enfermedades respiratorias, pulmonares e irritación ocular. En combinación con el agua produce ácido sulfúrico, principal componente de la lluvia ácida, que afecta negativamente la vegetación, las zonas urbanas y acidifica las aguas superficiales (Sanchez, J., et al., 1999 y WHO, 2018).

4.2.2 Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Son comúnmente medidos como dióxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de nitrógeno (NO). Las principales fuentes de emisiones antropogénicas del NO₂ son los procesos de combustión (calefacción, generación de electricidad, motores de vehículos y barcos).

Promueven la producción de contaminantes secundarios, ya que el NO y el NO₂ están involucrados en la formación de ozono troposférico. Asimismo, el NO contribuye al efecto invernadero y el NO₂ es clave en la formación de la lluvia ácida, ya que se transforma en ácido nítrico cuando entra en contacto con el agua de lluvia.

La exposición a niveles bajos de estos óxidos puede irritar los ojos, la nariz y la garganta. Además de producir falta de aliento y líquido en los pulmones, cuando la exposición es más prolongada. Si los niveles son muy altos pueden provocar enfermedades respiratorias (WHO, 2018).

4.2.3 Materia Particulado (PM)

Es en una mezcla de partículas sólidas y líquidas, de sustancias inorgánicas y orgánicas que se encuentran suspendidas en el aire. Sus principales componentes son los sulfatos, los nitratos, el amoníaco, el cloruro de sodio, el hollín, los polvos minerales, el polen y el agua (WHO, 2018).

Las fuentes naturales de PM son las erupciones volcánicas, las corrientes de aire y las tormentas. Por su parte, las principales fuentes antropogénicas son: el tráfico, las actividades industriales, la minería, la construcción y las cementeras. Comúnmente se mide el PM₁₀ (partículas con un diámetro de 10 micrones o menos) y el PM_{2.5} (partículas con un diámetro de 2,5 micrones o menos).

El PM₁₀ pueden penetrar y alojarse dentro de los pulmones, pero el PM_{2.5} pueden atravesar la barrera pulmonar y entrar en el sistema sanguíneo. La exposición crónica a este contaminante puede producir enfermedades cardiovasculares, respiratorias y hasta cáncer de pulmón. Según la OMS, es el contaminante que afecta a más personas a nivel mundial (Sanchez, J., et al., 1999; Vargas, 2011 y WHO, 2018).

5. Sistema de monitoreo ambiental

El sistema de monitoreo ambiental se lleva a cabo mediante las redes de vigilancia y previsión. Esta red es un conjunto de aparatos de medida de los diferentes contaminantes que proporcionan los datos de los niveles de inmisión, comunicándolos a centros de análisis y coordinación. La comunicación de la red automática se realiza vía radio, teléfono e internet y la gestión de los datos está totalmente informatizada. Esta red se instala de acuerdo a las necesidades de los distintos países o zona, pues dependerá del tipo de contaminación atmosférica que se vea expuesto (Instituto Nacional de Ecología).

Las principales funciones de una red de vigilancia de contaminantes atmosféricos son (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010):

- Determinar el estado de la calidad del aire y cumplir con las normas de calidad del aire vigente.

- Observar las tendencias a medio y largo plazo.
- Detectar rápidamente posibles situaciones de alerta o emergencia.
- Evaluar el riesgo para la salud humana.
- Determinar posibles riesgos para el medio ambiente.
- Informar a la población sobre la calidad del aire.
- Validar modelos de dispersión de la calidad del aire.
- Evaluar las estrategias de control de las autoridades ambientales.
- Estudiar las fuentes de contaminación.
- Investigar científicamente.

Dependiendo de la fuente de emisión, las estaciones de monitoreo se pueden clasificar en tres tipos:

- Fondo: El nivel de contaminación es la contribución de todas las fuentes a barlovento de la estación. No existe influencia por tráfico ni por industrias.
- Tráfico: Influenciadas principalmente por la contaminación procedente de una calle o carretera próxima.
- Industrial: Influenciadas principalmente por fuentes industriales de contaminación.

Las estaciones de monitoreo pueden medir los siguientes contaminantes:

- Dióxido de azufre (SO₂)
- Dióxido de nitrógeno (NO₂)
- Monóxido de nitrógeno (NO)
- Ozono (O₃)
- Material Particulado (PM₁₀ y PM_{2.5})
- Sulfuro de hidrógeno (SH₂)
- Monóxido de carbono (CO)
- BTX (benceno, tolueno y xileno)

Si las estaciones además disponen de una torre meteorológica, entonces se miden los siguientes parámetros meteorológicos:

- Dirección y velocidad del viento
- Humedad relativa
- Precipitación Pluvial
- Presión Atmosférica
- Temperatura ambiental
- Radiación solar

5.1 Estaciones de monitoreo ambiental en la región de Atacama

La región de Atacama cuenta con 21 estaciones de monitoreo de la calidad del aire, de las cuales 7 están ubicadas en la provincia de Copiapó, 2 están localizadas en la provincia de Chañaral y 12 en Huasco.

Las 2 estaciones que se encuentran en la provincia de Chañaral son propiedad de Codelco (Corporación Nacional del Cobre de Chile), empresa estatal chilena dedicada a la explotación

minera cuprífera. Todas son de tipo industrial y miden SO_2 y PM_{10} . Como se muestra en la tabla 5.1 las primeras mediciones se realizaron desde el año 1999 hasta el 2010.

En la provincia de Copiapó, una pertenece al Ministerio del Medio Ambiente y las otras seis son propiedad de ENAMI (Empresa Nacional de la Minería), la cual es estatal. Todas son operadas por la empresa privada Asesorías Algoritmos. Además, una es de tipo rural y las otras son urbanas. Como se ve en la tabla 5.2, las primeras mediciones comenzaron en 1993 y en solo dos estación las mediciones se mantienen hasta la actualidad. Es importante indicar que la mayoría de las estaciones mide SO_2 y PM_{10} , y que solo en una se mide $\text{PM}_{2.5}$.

De las 12 estaciones que están ubicadas en la provincia de Huasco solo una pertenece al Ministerio del Medio Ambiente, la cual es operada por Asesorías Algoritmos. Las otras son propiedad de la Empresa Eléctrica Guacolda y son operadas por CESMEC, ambas empresas privadas. En relación al tipo de estación, 4 son urbanas, 1 es industrial y 7 son rurales. Como se aprecia en la tabla 5.1, 11 estaciones miden SO_2 , 2 miden $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , NO y NO_2 . Las mediciones en esta provincia comienzan el año 2000 y en 11 de las 12 estaciones continúan operativa.

En la figura 5.1 se indican espacialmente las ubicaciones de las estaciones, la mayoría coincide con los asentamientos urbanos más grandes, fundiciones y empresas termoeléctricas.

Además, en algunas de las estaciones se miden los siguientes parámetros meteorológicos (véase la tabla 5.2):

- Temperatura
- Presión atmosférica
- Dirección y velocidad del viento
- Humedad relativa
- Precipitaciones
- Radiación global

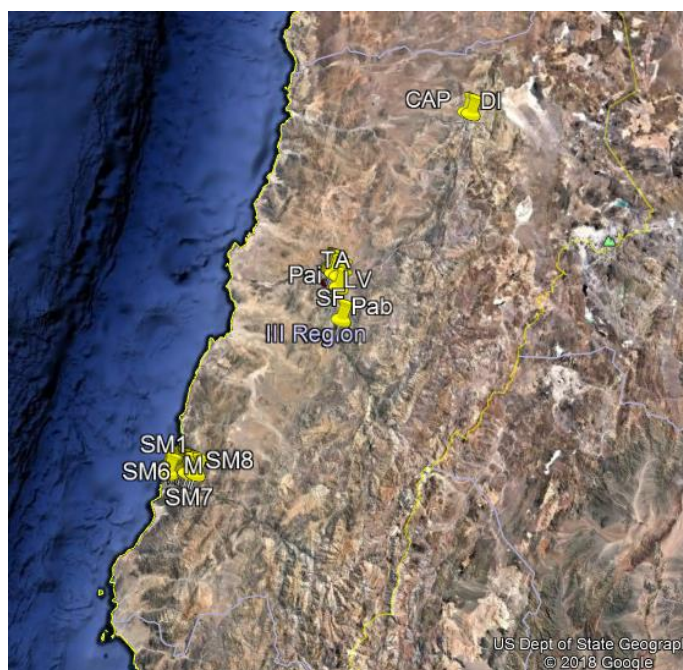


Figura 5.1. Ubicación de las estaciones. Fuente: SINCA, 2018. Elaboración propia.

Tabla 5.1. Estaciones en la región de Atacama. Fuente: SINCA, 2018. Elaboración propia.

Estación de monitoreo	Símbolo	Tipo	Provincia	Contaminante	Primer registro	Último registro	Años
Copiapo Sívica	CS	Urbana	Copiapó	PM ₁₀ y PM _{2.5}	18-10-2013	20-06-2018	5
Copiapó	C	Urbana		SO ₂ y PM ₁₀	18-10-2013	20-06-2018	5
Los Volcanes	LV	Urbana		SO ₂ y PM ₁₀	01-01-1993	09-11-2009	14
Paipote	Pai	Urbana		SO ₂ y PM ₁₀	01-02-1999	31-03-2009	17
San Fernando	SF	Urbana		SO ₂ y PM ₁₀	01-07-1995	29-11-2009	18
Pabellón	Pab	Rural		SO ₂	01-01-2003	29-12-2003	15
Tierra Amarilla	TA	Urbana		SO ₂ y PM ₁₀	01-01-1993	30-12-2009	17
CAP	CAP	Industrial	Chañaral	SO ₂ y PM ₁₀	01-02-1999	30-03-2009	8
Doña Ines	DI	Industrial		SO ₂ y PM ₁₀	01-01-1993	30-12-2009	12
Huasco Sívica	HS	Urbana	Huasco	PM _{2.5}	01-02-1999	30-03-2009	4
EME F	F	Urbana		SO ₂ , NO, NO ₂ , PM ₁₀ y PM _{2.5}	01-01-1994	29-04-2009	17
EME M	M	Urbana		SO ₂ , NO, NO ₂ y PM ₁₀	01-01-1993	30-12-2009	18
EME ME	ME	Urbana		SO ₂	01-02-1999	30-03-2009	10
SM1 Vertedero	SM1	Industrial		SO ₂	01-09-2002	29-11-2010	16
SM2 Quinta La Rosa	SM2	Rural		SO ₂	04-09-2002	27-11-2010	16
SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo	SM3	Rural		SO ₂	01-06-2001	29-11-2010	16
SM4 Carretera km 40	SM4	Rural		SO ₂	14-01-1999	27-11-2010	16
SM5 Parcela 5 El Pino	SM5	Rural		SO ₂	01-06-2014	19-06-2018	16
SM6 Parcela Buena Esperanza	SM6	Rural		SO ₂	01-01-2002	20-06-2018	16
SM7 Los Loros	SM7	Rural		SO ₂	05-01-2003	20-09-2017	16
SM8 Freirina	SM8	Rural		SO ₂	01-01-2002	20-06-2018	16

Tabla 5.2. Estaciones y los parámetros meteorológicos medidos. Fuente: SINCA, 2018.
Elaboración propia.

Estación	Parámetro meteorológico	Uni	Estación	Parámetro meteorológico	Uni
Copiapó	Dirección del viento	°	San Fernando	Dirección del viento	°
	Velocidad del viento	m/s		Velocidad del viento	m/s
Paipote	Dirección del viento	°	Tierra Amarilla	Dirección del viento	°
	Velocidad del viento	m/s		Velocidad del viento	m/s
CAP	Radiación global	W/m ²	Doña Inés	Radiación global	W/m ²
	Presión atmosférica	hPa		Presión atmosférica	hPa
	Precipitaciones	mm/h		Precipitaciones	mm/h
	Humedad relativa	%		Humedad relativa	%
	Temperatura ambiente			Temperatura	°C
	Dirección del viento	°		Dirección del viento	°
	Velocidad del viento	m/s		Velocidad del viento	m/s
Huasco Sívica	Radiación global	W/m ²	EME ME	Radiación global	W/m ²
	Humedad relativa	%		Presión atmosférica	mmHg
	Temperatura ambiente	°C		Precipitaciones	mm/h
	Dirección del viento	°		Humedad relativa	%
	Velocidad del viento	m/s		Temperatura	°C
SM4 Carretera	Dirección del viento	°		Dirección del viento	°
	Velocidad del viento	m/s		Velocidad del viento	m/s
SM8 Freirina	Dirección del viento	°			
	Velocidad del viento	m/s			

5.2 Técnicas de mediciones de los contaminantes

En la mayoría de las estaciones de la región de Atacama no se informa de las técnicas de mediciones de los contaminantes utilizados.

En algunos casos a pesar que se mide el mismo contaminante, la técnica es diferente, esto producto de la diferencia temporal en que comienza a operar la estación. A continuación se detalla el método de medida según el contaminante.

5.2.1 Dióxido de azufre (SO₂)

Para el caso del dióxido de azufre como se muestra en la tabla 5.3, en 6 de las 19 estaciones la técnica utilizada corresponde al de fluorescencia ultravioleta, en las otras 13 estaciones no se informa del método utilizado.

Tabla 5.3. Estaciones y las técnicas de medición de SO₂ utilizadas. Fuente: SINCA, 2018. Elaboración propia.

Estación	Técnica de medición	Estación	Técnica de medición
Copiapó	Fluorescencia ultravioleta	EME ME	No informado
Los Volcanes	Fluorescencia ultravioleta	SM1 Vertedero	No informado
Paipote	Fluorescencia ultravioleta	SM2 Quinta La Rosa	No informado
San Fernando	Fluorescencia ultravioleta	SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo	No informado
Pabellón	Fluorescencia ultravioleta	SM4 Carretera km 40	No informado
Tierra Amarilla	Fluorescencia ultravioleta	SM5 Parcela 5 El Pino	No informado
CAP	No informado	SM6 Parcela Buena Esperanza	No informado
Doña Inés	No informado	SM7 Los Loros	No informado
EME F	No informado	SM8 Freirina	No informado
EME M	No informado		

5.2.2 Óxidos de nitrógeno (NO_x)

En el caso de los óxidos de nitrógeno (NO, NO₂ y NO_x) no se informa de la técnica de medición utilizada, tal y como se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Estaciones y las técnicas de medición de NO, NO₂ y NO_x utilizadas. Fuente: SINCA, 2018. Elaboración propia.

Estación	Contaminante	Técnica de medición
EME F	NO	No informado
	NO ₂	No informado
EME M	NO	No informado
	NO ₂	No informado
	NO _x	No informado

5.2.3 Materia Particulado (PM)

En la tabla 5.5 se indican las técnicas de mediciones utilizadas para PM₁₀ y para PM_{2.5}. En una de las tres estaciones que miden PM_{2.5} no se informa del método utilizado y en 5 de las 11 estaciones que miden PM₁₀ no se informa de dicha técnica.

Tabla 5.5. Estaciones y las técnicas de medición de PM₁₀ y PM_{2.5} utilizadas. Fuente: SINCA, 2018. Elaboración propia.

Estación	Contaminante	Técnica de medición
Copiapo Sívica	PM ₁₀	Atenuación Beta - Thermo FH62C-14
	PM _{2.5}	Atenuación Beta - Environnement MP101M
Copiapó	PM ₁₀	Método gravimétrico de muestreador de alto volumen equipado con cabezal PM10
Los Volcanes	PM ₁₀	No informado
Paipote	PM ₁₀	Gravimetría (Otros)
San Fernando	PM ₁₀	Gravimetría (Otros)
Tierra Amarilla	PM ₁₀	Gravimetría (Otros)
CAP	PM ₁₀	No informado
Doña Inés	PM ₁₀	No informado
Huasco Sívica	PM _{2.5}	Atenuación de radiación beta - Met one BAM1020
EME F	PM ₁₀	No informado
	PM _{2.5}	No informado
EME M	PM ₁₀	No informado

6. Normativa

La normativa ambiental es un instrumento de la gestión ambiental que tiene como objetivo proteger la salud de las personas y el medioambiente, por medio del establecimiento de valores límites para cada contaminante.

En este caso, los resultados obtenidos se comparan con las siguientes normativas: chilena, OMS (Organización Mundial de la Salud), EPA (Environmental Protection Agency) y UE (Unión Europea).

6.1 Normativa Chilena

Las normas ambientales chilenas fueron dictadas bajo la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, existiendo actualmente distintas normativas según el contaminante.

En este trabajo se utilizan las siguiente: D.S. N° 113/02 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República sobre Norma de Calidad de Aire para SO₂ publicada el 2003, D.S. N°

114/02 sobre Norma de Calidad de Aire para Dióxido de Nitrógeno NO₂ publicada el 2003, D.S. N° 59/98 sobre Norma de Calidad para PM₁₀ publicada en 1998 y modificado por el D.S. N° D.S. 45 el año 2001.

En la tabla 6.1 se resume la normativa chilena utilizada para este estudio para cada contaminante, con sus valores límites y tiempo de medición.

Tabla 6.1. Normativa Chilena. Fuente: D.S. N° 113/02; D.S. N° 114/02; D.S. N° 59/98; D.S. N° 45/01 y D.S.N°12/11.

Contaminante	Valor Límite	Período	Forma	Normativa
SO₂	96 ppbv (250 µg/m ³)	24 horas	99% de las concentraciones máximas diarias de 1 hora, promediado en 3 años consecutivos	D.S. N° 113/02
	31 ppbv (80 µg/m ³ N)	1 año	Promedio aritmético de 3 años consecutivos	
NO₂	213 ppbv (400 µg/m ³)	1 hora	99% de las concentraciones máximas diarias de 1 hora, promediado en 3 años	D.S. N° 114/02
	53 ppbv (100 µg/m ³)	1 año	Promedio aritmético de 3 años consecutivos	
PM₁₀	150 µg/m ³	24 horas	98% de las concentraciones máximas diarias de 1 hora, en 1 año. O si en 7 días se supera el valor límite en año.	D.S. N° 59/98 y 45/01
	50 µg/m ³	1 año	Promedio aritmético de 3 años consecutivos	
PM_{2.5}	50 µg/m ³	24 horas	98% de las concentraciones máximas diarias de 1 hora, en 1 año.	D.S.N°12/11
	20 µg/m ³	1 año	Promedio aritmético de 3 años consecutivos	

6.2 Normativa Estadounidense (EPA)

La EPA (Environmental Protection Agency o Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) es una agencia reguladora autorizada por el Congreso de EE.UU. para establecer normas y reglamentos que tienen un carácter de obligatorios y que son aplicables a individuos, negocios, gobiernos estatales y locales, instituciones sin fines de lucro, entre otros. Estos reglamentos son

codificados anualmente en el Código de Reglamentos Federales de EE.UU. Título 40: Protección del Medio Ambiente, encargándose la salud humana y el medio ambiente.

La EPA establece los estándares nacionales de calidad del aire ambiental para seis contaminantes principales, los cuales son señalados en la tabla 6.2, junto al tipo de contaminante, valor límite y período de medición.

Tabla 6.2. Normativa de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Fuente: NAAQS, 2015.

Contaminantes	Tipo	Valor Límite	Período	Forma
SO₂	Primario	75 ppb (197 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1 hora	Percentil 99 de concentraciones máximas diarias de 1 hora, promediados en 3 años
	Secundario	0,5 ppm (1310 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3 horas	No debe excederse más de una vez al año
NO₂	Primario	100 ppb (188 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1 hora	Percentil 98 de las concentraciones máximas diarias de 1 hora, promediados en 3 años
	Primario y Secundario	53 ppb (99,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1 año	Promedio Anual
PM₁₀	Primario y Secundario	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 horas	No debe exceder más de una vez al año en 3 años
PM_{2.5}	Primario	12,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 año	Media anual, promedio de 3 años
	Secundario	15,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 año	Media anual, promedio de 3 años
	Primario y Secundario	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 horas	Percentil 98 de las concentraciones, promediados en 3 años

Los estándares anteriores de SO₂ (0,14 ppm o 367 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 horas y 0,03 ppm o 78,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ anuales) seguirán siendo válidos en ciertas áreas del país.

6.3 Normativa Unión Europea (UE)

La Unión Europea sigue la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Esta directiva establece objetivos de calidad del aire ambiente para proteger la salud humana y

el medio ambiente, considerando las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS). En la tabla 6.3 se indican los valores límites para cuatro contaminantes.

Tabla 6.3. Normativa Europea. Fuente: European Union Law, 2008.

Contaminante	Valor límite	Período	Forma
SO₂	350 µg/m ³	1 hora	No podrá superarse más de 24 veces por año civil
	125 µg/m ³	1 día	No podrá superarse más de 3 veces por año civil
NO₂	200 µg/m ³	1 hora	No podrá superarse más de 18 veces por año civil
	40 µg/m ³	Año Civil	Promedio Anual
PM₁₀	50 µg/m ³	1 hora	No podrá superarse más de 35 veces por año civil
	40 µg/m ³	Año Civil	Promedio Anual
PM_{2.5}	25 µg/m ³	Año Civil	Promedio Anual

Además, es importante indicar los umbrales de alerta, los cuales se resumen en la tabla 6.4.

Tabla 6.4. Umbrales de Alerta de la Normativa Europea. Fuente: European Union Law, 2008.

Contaminante	Umbral	Período
SO₂	500 µg/m ³	3 horas consecutivas
NO₂	400 µg/m ³	3 horas consecutivas

6.4 Valores guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS)

La OMS cuenta con las “Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y del dióxido de azufre”, la cual fue actualizada por última vez el año 2005. Se enfoca en la protección de la salud y el bienestar de los humanos; teniendo como objetivo orientar sobre la manera de reducir los efectos de contaminación del aire.

Estas guías son de uso mundial; se orientan a conseguir una calidad del aire que proteja la salud pública. En la tabla 6.5 se indican los valores guías dispuestos por la OMS.

Tabla 6.5. Valores guías de la Organización Mundial de la Salud. Fuente: OMS, 2005.

Contaminante	Valor Límite	Período
SO₂	Límite 24 horas: 20 µg/m ³	Promedio Diario
NO₂	Límite 1 hora: 200 µg/m ³	Promedio Horario
	Límite anual: 40 µg/m ³	Promedio Anual
PM₁₀	Límite 24 horas: 50 µg/m ³	Promedio Diario
	Límite anual: 20 µg/m ³	Promedio Anual
PM_{2.5}	Límite 24 horas: 25 µg/m ³	Promedio Diario
	Límite anual: 10 µg/m ³	Promedio Anual

7. Metodología de Investigación

Para realizar un análisis sobre la calidad del aire en la región de Atacama, se tomaron en consideración los datos disponibles en el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire del Gobierno de Chile, estos datos son diarios y corresponden a 21 estaciones de monitoreo distribuidas por la región entre los años 1993 hasta el 2018.

Se realizó una validación de los datos disponibles y posteriormente se efectuó un análisis para determinar las tendencias diarias y anuales de SO₂, NO, NO₂, PM₁₀ y PM_{2.5}. Además, para evaluar la calidad del aire en la zona, las tendencias fueron comparadas con la normativa chilena, las directrices de la OMS, los estándares de la UE y de la EPA.

La metodología de investigación aplicada fue la siguiente:

- Revisión bibliográfica del área de estudio (características geográficas, clima, vegetación, precipitaciones, temperatura, radiación solar, viento y actividades económicas).
- Validación de los datos proporcionados desde el año 1993 a 2018.
- Análisis de los datos en diferentes escalas temporales: diario y anual.
- Análisis de la relación del clima y de la geografía con la contaminación.
- Comparación de las tendencias de los contaminantes analizados con la normativa chilena, las directrices de la OMS, los estándares de la UE y de la EPA.
- Discusión y propuestas de mejoras sobre la calidad del aire en la región de atacama y sobre la legislación en Chilena.

Para el análisis de los datos validados, estos datos se dividieron en las 3 provincias de la región de Atacama: Chañaral, Copiapó y Huasco. Esta división se efectuó para un mejor análisis de la zona, pues las estaciones ubicadas en la provincia de Chañaral están cercanas a la fundición Potrerillos y a la minera a Cielo abierto El Salvador. En la provincia de Copiapó las estaciones están próximas a la fundición Hernán Videla Lira, a la minera a cielo abierto La Candelaria y a las centrales termoeléctricas Cenizas y Termopacífico. Finalmente en la provincia de Huasco se localizan el puerto de Huasco y las centrales termoeléctricas Guacolda, Huasco TG y Huasco Vapor.

7.1 Validación de los datos

En la Normativa Chilena sobre Calidad del Aire se establece que se debe contar con el 75% de los datos para que estos sean válidos (D.S. N° 113/02 para SO₂, D.S. N° 114/02 para NO₂ y D.S. N° 12/11 para PM_{2.5}). La UE y EPA indican el mismo porcentaje para poder asegurar su validez, sin embargo, en los criterios de la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo, establece que para la media anual es necesario el 90% de los valores horarios o de los valores correspondientes a 24 horas a lo largo del año. En este estudio se consideran validos los años que cuentan con el 75% o más de los datos.

En las tablas 7.1 y 7.2 se indica que el SO₂ fue medido en 19 estaciones entre los años 1993 al 2010 y que la mayoría de los años cuenta con valores por sobre el 75%. En cambio, entre los años 2011 al 2018 no se cuenta con datos para ser analizados.

Tabla 7.1. Validación de los datos disponibles desde el año 1993 al 2010 para SO₂ en las estaciones Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando, Pabellón, Tierra Amarilla, CAP y Doña Inés. Elaboración propia.

Estación	SO ₂																	
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Copiapó	100%	97%	90%	100%	98%	88%	94%	93%	100%	94%	90%	80%	87%	96%	79%	90%	26%	
Los Volcanes			97%	88%	91%	91%	78%	90%	95%	99%	89%	94%	100%	98%	70%	74%	58%	
Paipote	97%	94%	98%	100%	90%	100%	100%	95%	100%	100%	100%	98%	98%	99%	91%	97%	92%	
San Fernando	100%	96%	88%	92%	93%	76%	93%	98%	100%	100%	100%	99%	99%	100%	91%	90%	80%	
Pabellón		92%	85%	88%	93%	79%	79%	97%	99%	99%	98%	99%	95%	98%	90%	88%	97%	
Tierra Amarilla	96%	92%	98%	98%	99%	98%	94%	99%	100%	100%	99%	100%	99%	99%	91%	97%	93%	
CAP										98%	98%	100%	100%	100%	95%	96%	72%	95%
Doña Inés									87%	92%	98%	94%	90%	92%	85%	84%	77%	85%

Tabla 7.2. Validación de los datos disponibles desde el año 2000 al 2018 para SO₂ en las estaciones EME F, EME M, EME ME, SM1, SM2, SM3, SM4, SM5, SM6, SM7 y SM8. Elaboración propia.

Estación	SO ₂																		
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
EME F			83%	91%	48%	0%	0%	0%	0%	99%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
EME M	67%	95%	93%	99%	99%	100%	100%	27%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
EME ME			0%																
SM1 Vertedero			98%	100%	100%	100%	99%	97%	100%	100%	99%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SM2 Quinta La Rosa			99%	98%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo			99%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	99%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SM4 Carretera km 40			99%	99%	100%	99%	99%	100%	96%	99%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SM5 Parcela 5 El Pino			99%	96%	96%	100%	93%	100%	100%	99%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SM6 Parcela Buena Esperanza			99%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	99%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SM7 Los Loros			99%	99%	95%	100%	100%	100%	100%	96%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SM8 Freirina			100%	98%	95%	100%	97%	93%	97%	99%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

En la tabla 7.3 se indican los datos disponibles para el NO, el cual solo cuenta con datos en las estaciones EME F y EME M entre los años 2003 al 2018, aunque los datos validados están entre los años 2004 al 2010.

Tabla 7.3. Validación de los datos disponibles desde el año 2003 al 2018 para NO en las estaciones EME F y EME M. Elaboración propia.

Estación	NO															
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
EME F	25%	89%	98%	78%	98%	98%	84%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
EME M		98%	92%	94%	89%	99%	98%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

En cuanto al NO₂, la información se muestran en la tabla 7.4, con datos disponibles en las estaciones EME F y EME M desde el 2002 al 2018, aunque los validados solo se encuentran entre los años 2002 al 2010, ya que desde el 2011 no se cuenta con datos para ser analizados.

Tabla 7.4. Validación de los datos disponibles desde el año 2002 al 2018 para NO₂ en las estaciones EME F y EME M. Elaboración propia.

Estación	NO2																
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
EME F	83%	91%	48%	81%	98%	78%	100%	96%	84%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
EME M	89%	100%	98%	90%	98%	88%	99%	98%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

En la tabla 7.5 se indican los datos disponibles para PM₁₀, el cual es medido en 10 estaciones desde el año 1999 al 2018, pero solo en 2 estaciones se cuenta con el mínimo del 75% de los datos. Para ser más específicos, en Copiapó Sívica los datos validados están entre el año 2013 al 2018 y en Los Volcanes solo se analiza el año 2003.

Tabla 7.5. Validación de los datos disponibles desde el año 1999 al 2018 para PM₁₀ en las estaciones Copiapó Sívica, Copiapó, Los Volcanes, Paipote, San Fernando, Tierra Amarilla, CAP, Doña Inés, EME F y EME M. Elaboración propia.

Estación	PM ₁₀																				
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Copiapó Sívica															100%	95%	89%	98%	98%	77%	
Copiapó	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	32%	6%										
Los Volcanes					100%																
Paipote	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	32%	21%										
San Fernando	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	32%	10%										
Pabellón																					
Tierra Amarilla	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	32%	21%										
CAP				33%	33%	33%	28%	24%	28%	32%	0%	0%									
Doña Ines	32%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	28%	28%	30%	32%									
Huasco Sívica																					
EME F			34%	33%	33%	32%	33%	33%	33%	33%	33%	33%									
FMF M			31%	33%	33%	33%	34%	33%	33%	33%	33%	33%									

Por último, en la tabla 7.6 se indica la información disponible para PM_{2.5}. Para este contaminante, se cuenta con información en 3 estaciones, desde el año 2012 hasta la actualidad, pero solo en 2 estaciones se dispone con una cantidad de datos igual o mayor al 75%. En la

estación Copiapó Sívica los datos hacer analizados están entre el año 2013 al 2018 y en Huasco Sívica desde el 2014 al 2018.

Tabla 7.6. Validación de los datos disponibles desde el año 2012 al 2018 para PM_{2.5} en las estaciones Copiapó Sívica, Huasco Sívica y EME F. Elaboración propia.

Estación	PM _{2.5}						
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Copiapó Sívica		100%	95%	89%	98%	98%	77%
Huasco Sívica			99%	99%	99%	96%	75%
EME F	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tanto para el SO₂, como el NO y el NO₂ se disponen con datos validados hasta el 2010. En cambio, para material particulado los años de análisis son más recientes, pues están entre el año 2013 al 2018. Es importante aclarar que el espacio en blanco corresponde a los años en que las estaciones no registran oficialmente datos.

7.2. Análisis de los datos validados

Para el análisis de los datos validados, se graficaron las concentraciones de los contaminantes (SO₂, NO, NO₂ y PM₁₀ y PM_{2.5}) en función del tiempo. Se realizó un análisis de las concentraciones diarias y se contrastaron las tendencias con el clima, la geografía y las posibles fuentes contaminación en la región.

Además, se compararon las concentraciones diarias y anuales con las normativas de Chile, de la UE, de la EPA y los valores guías de la OMS.

8. Antecedentes de la Región de Atacama

A continuación se enumeran los antecedentes importantes de la región de Atacama relacionados a la calidad del aire.

Provincia de Chañaral (CONAMA: Control de la Contaminación, 2005):

- 1991: Se realizó el Plan de Descontaminación de Potrerillos (D.S. N° 185/91), el cual estipuló que Codelco, División El Salvador, debía instalar una red de monitoreo de la calidad del aire en el Campamento de Potrerillos, ubicado próximo a la fundición Potrerillos.
- 1994: La División Salvador instaló la estación fija Doña Inés, ubicada en el edificio que antiguamente ocupaba la Escuela D4, en la localidad de Potrerillos.
- 1997: Se declaró el área circundante a la fundición como zona saturada por SO₂ y PM, por medio del D.S. N° 18/97.

- 1998: A través del D.S. N° 179/98 se estableció el Plan de Descontaminación Atmosférica, el cual limita las emisiones atmosféricas de SO₂ y de PM. Además, estableció que desde el 2003 se debe verificar el cumplimiento de las normas de calidad de aire para estos 2 contaminantes.

- 1999: Codelco previendo que no cumpliría con las normas de calidad del aire dentro del área saturada, trasladó a toda la población de Potrerillos a otras localidades. Así, el área donde está instalada la fundición quedó con acceso sólo para los trabajadores. Se habilitó a 3 kilómetros al Noroeste de la fundición (fuera del área saturada) un campamento dormitorio y se instaló la estación CAP.

- 2000: Codelco solicitó flexibilidad o dejar sin efecto las exigencias del D.S. N° 179/98, debido a la ausencia de población en Potrerillos. La Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA), con la aprobación del Ministerio de Salud y del Servicio de Salud de Atacama, le otorgó más flexibilidad al plan. De esta manera, no se aplicaron las normas de calidad del aire en la zona saturada, pero se mantuvieron las exigencias referidas a las emisiones anuales como máximos permisibles de emisión.

Provincia de Copiapó (CONAMA: Unidad de Planes y Normas, 2005):

- 1993: Se declararon como zonas saturadas por SO₂ a las localidades de Tierra Amarilla, Pabellón, San Fernando y Estación Paipote a través del D.S. N° 255/1993, esto producto de las emisiones provenientes de la fundición Hernán Videla Lira.

- 1995: La fundición Hernán Videla Lira elaboró un Plan de Descontaminación, el cual fue aprobado por el D.S. N° 180/1995. En el plan se presentó un programa de reducción de emisiones de azufre, para que en un plazo de cinco años se cumpliera con las normas de calidad del aire. Además, se obligó a la empresa a reducir en un 40% como mínimo, las emisiones de S durante los meses de invierno a partir del año 1995. Así mismo, se estableció que las emisiones de PM y arsénico (As) se redujesen en un 67%, en un plazo de cinco años. En la tabla 8.1 se indican las principales acciones de dicho plan.

Tabla 8.1. Principales acciones del plan de descontaminación en la provincia de Copiapó.
Fuente: CONAMA: Unidad de Planes y Normas, 2005.

Año	Acción	Efecto
1995	Se pone en marcha una Ecosonda que mide meteorología en altura.	Se pueden prever las condiciones meteorológicas y así disminuir la fusión para evitar episodios de contaminación.
1995	Se inaugura Sexta Estación de Monitoreo Ambiental.	Se obtiene un monitoreo ambiental más completo.
1996	Se transforma el convertidor Hoboken en Pierce Smith.	Se mejora la captación de gases en fundición.
1996	Entra en operaciones la nueva Planta de ácido sulfúrico de la fundición.	Se aumenta la captación de gases a un 65%, disminuyendo la contaminación.
1997	Comienza a operar la nueva Planta de oxígeno.	El convertidor Teniente aumenta su fusión sin contaminar.
1998	Se apaga el horno reverbero.	La chimenea de la fundición casi no arroja humo.
2002	Se instala un horno de limpieza de escoria.	

Provincia de Huasco

- 2011: Se declaró Zona Latente por Material Particulado Respirable MP10 como concentración anual, a la localidad de Huasco y su zona circundante, a través del decreto supremo N° 40.
- 2014: Por la resolución exenta N° 542 se inició la elaboración del Plan de Prevención de Contaminación Atmosférica para la Localidad de Huasco y su Zona Circundante.
- 2015: Por la resolución exenta N° 1295 se aprobó el Anteproyecto del Plan de Prevención de Contaminación Atmosférica para la Localidad de Huasco y su zona circundante.
- 2016: A través del decreto supremo N° 38 se establece el Plan de Prevención de Contaminación Atmosférica para la Localidad de Huasco y su Zona Circundante, el cual tiene un plazo de implementación de 10 años para que las fuentes de emisión se adapten a las nuevas exigencias, y luego se pueda realizar un seguimiento y verificación del cumplimiento.

9. Resultados y Discusión

9.1 Análisis de las concentraciones por contaminantes y comparación con las normativas vigentes

Se analizaron las series temporales de las concentraciones de los siguientes contaminantes: SO_2 , NO , NO_2 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ en cada estación, generando series temporales que permitieron observar el comportamiento y las tendencias. Para el caso del SO_2 , se realizaron series temporales desde el año 1993 al 2010, para los NO_x desde el 2002 al 2010 y para el PM desde el 2002 al 2018. Desgraciadamente para el SO_2 y NO_x , el análisis temporal se extiende hasta el año 2010, con posterioridad no hay datos disponibles en la página web del SINCA (Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire).

Además, los valores medidos se comparan con los valores límites estipulados en Chile, la UE, la EPA y la OMS.

9.1.1. Dióxido de azufre (SO_2)

Para el caso del SO_2 el análisis de la región se separó en las tres provincias: Chañaral, Copiapó y Huasco, ya que al contar con datos validados en 18 estaciones resulta más comprensible separar el estudio, porque en cada una de ellas existen fuentes de emisión de SO_2 que están bien definidas y son diferentes.

Es importante señalar que los rangos en el eje Y de los gráficos de concentraciones diarias son diferentes en las 3 provincias, esto es porque el rango de concentraciones es muy dispar, pues en la provincia de Chañaral el rango de concentraciones diarias está entre 0 a $2613 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en Copiapó va de 0 a $1022 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en Huasco está desde 0 a $141 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo tanto son niveles de contaminación diferentes en su orden de magnitud. Lo mismo sucede con el análisis anual, los ejes Y de los gráficos son diferentes: en Chañaral el rango está de 0 a $662,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en Copiapó de 0 a $182,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en Huasco de 0 a $41,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Se comparan las concentraciones del SO_2 con los valores límites diarios establecidos por Chile ($250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), por la UE ($125 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y por la OMS ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y con el límite anual que fija la normativa chilena ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Provincia de Chañaral

Se encuentran dos estaciones que miden las concentraciones de SO_2 : CAP y Doña Inés (DI), ambas son de tipo industrial y de propiedad estatal. Están cercanas a la mina a cielo abierto El Salvador y a la fundición Potrerillos, ambas propiedad de Codelco, que también es una empresa estatal.

La estación DI fue la primera que se instaló y se encuentra en la localidad minera de Potrerillos, poblado hasta el año 1999. Como se muestra en la figura 9.1 se ubica a 500 metros al noroeste de la fundición Potrerillos, y a 25 km al sureste de la mina a cielo abierto El Salvador. Por su parte, la estación CAP se localiza en el campamento dormitorio para los trabajadores de Codelco que está a 3 km al noroeste de la fundición y a 20 km al sureste de la mina El Salvador.



Figura 9.1. Ubicación del poblado El Salvador (rojo con punto negro), de la Minera El Salvador (verde), de la fundición Potrerillos (rojo) y de las estaciones DI y CAP (amarillo).

En la figura 9.2 se representan las concentraciones diarias de SO_2 en la provincia de Chañaral, desde los años 2001 al 2010. Las altas concentraciones de este contaminante, tanto en la estación DI como en CAP, se deben a la fundición Potrerillos, la cual tiene una capacidad de 640 kt de concentrado de Cu/año lo que equivalente al 11% de la capacidad nacional; ha utilizado carbón (2 – 7% de S) y actualmente usa gasóleo (0,005% de S) como combustible.

En las gráficas de la figura 9.2 se aprecia que en DI y en CAP las concentraciones de SO_2 son altas, superando los valores límites estipulados por Chile, la UE y la OMS. Las concentraciones más altas se dan en DI, ya que está a solo 450 metros de distancia de la fundición.

Las concentraciones en la estación DI tienen un comportamiento cíclico anual. Los valores más bajos se dan en diciembre, enero y febrero, correspondientes al período estival. La explicación a este comportamiento es porque en la época de invierno y dado que la zona analizada está en un valle, los gases se dispersan menos, pues las condiciones meteorológicas como las bajas temperaturas, la baja velocidad del viento y la capa de inversión térmica cercana a la superficie producen que los gases permanezcan estables en la baja atmósfera. Esta situación mejora en primavera y verano, ya que las condiciones atmosféricas (las altas temperaturas, las mayores velocidades del viento y la capa de inversión térmica con más altura) dispersan mejor los contaminantes.

En CAP las concentraciones están bajo los $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pues a pesar que el valor máximo es de $1470 \mu\text{g}/\text{m}^3$, solo existen 2 valores por sobre los $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los cuales se producen el 4 de noviembre de 2004 ($1470 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el 10 de febrero de 2005 ($1195 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Aun así, los niveles de SO_2 son altos. CAP tiene medidas de SO_2 que no varían mayormente a través de los años. Algo

similar ocurre en DI, en donde la concentración no cambia a través de los años, excepto cuando se pasa desde el año 2009 al 2010, en donde los niveles de concentración bajan notoriamente. La máxima el 2009 fue de 2406 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en cambio el 2010 la concentración máxima fue de 979 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. No es posible afirmar que la tendencia es a la baja, ya que solo se cuentan con datos validados hasta el 2010. Tampoco se ha podido encontrar la razón de la disminución de la concentración ese año, representando una reducción en un factor de 4,5, que aun así siguen siendo valores elevados. Se piensa que puede ser por la concentración de azufre en el combustible utilizado, pues la fundición Potrerillos no ha cambiado de tecnología y continua funcionando con el mismo tipo de combustible, así lo indican los reportes de sustentabilidad de Codelco correspondientes al año 2009 y 2010. Por otro lado, la empresa no ha bajado su capacidad de producción, por lo menos eso muestran dichos informes. Otra hipótesis, es la implementación de nueva tecnología en la captación del SO_2 , pero tampoco existe registro de esto (Codelco, 2010; Codelco, 2011; Codelco División El Salvador, 2011).

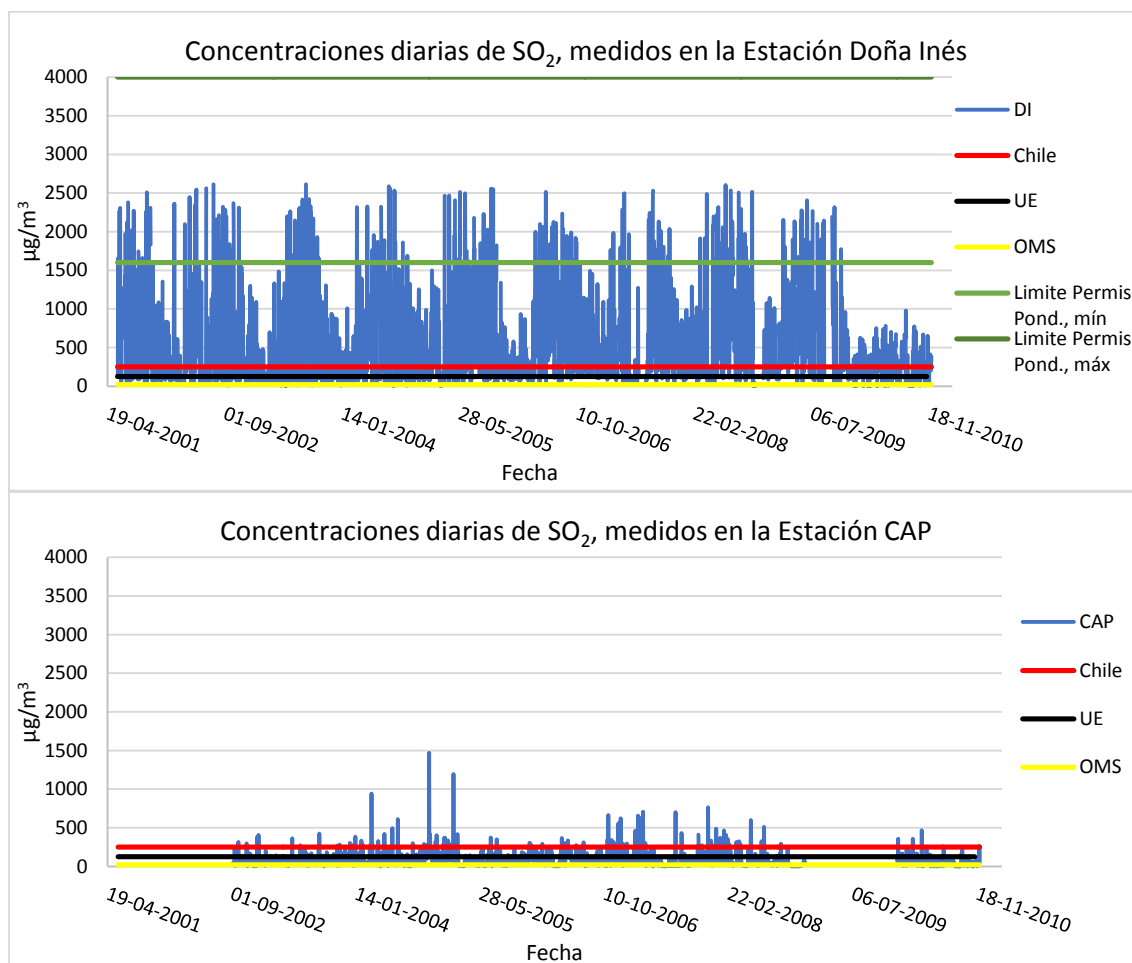


Figura 9.2. Concentraciones diarias de SO_2 en la provincia de Chañaral, desde año 2001 al 2010.

En la estación DI, los datos validados están entre los años 2001 al 2010, según la tabla 9.1 el rango de concentraciones está entre 0 a 2613 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio resulta de 546,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación estándar es de 575,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En CAP, los valores validados están entre los años 2002

al 2008 y en el año 2010, el rango está entre 0 y 1470 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 85,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación es de 93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 9.1. Rango, promedio y desviación estándar en las estaciones CAP y DI.

Provincia	Estación	Rango [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Desviación estándar [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Chañaral	DI	0 - 2613	546,3	575,2
	CAP	0 - 1470	85,8	93

Al comparar los promedios de la tabla 9.1 se verifica que la estación DI supera en 6,4 veces el promedio en CAP, a pesar de que las estaciones están distantes a 3 km, la gran diferencia en términos de concentraciones es debido a que el viento no dispersa en su totalidad los contaminantes hacia la CAP, porque las velocidades del viento en la zona son bajas (10,8 – 28,8 km/h) y porque la dirección del viento es mayoritariamente hacia el norte y noreste, en cambio CAP se encuentra al noroeste de DI (véase la figura 9.1).

Al comparar los promedios y las desviaciones estándares por estación (véase la tabla 9.1), se verifican que estos son similares, por lo que casi no existe variación en las concentraciones a través de los años, salvo su ciclo anual y la baja de concentración el año 2010 en DI.

Producto de las altas concentraciones de SO_2 en la zona, el año 1998 se estableció el plan de descontaminación atmosférica, en donde se limitaron las emisiones de SO_2 y de PM, se implementó el plan de manejo y limpieza de gases, se instaló una planta de fabricación de ácido sulfúrico y se reemplazó el horno de reverbero que funcionaba con carbón por el horno modificado tipo Teniente que utiliza gasóleo; esto último produjo un menor requerimiento de materiales y de combustible. Sumado a las medidas anteriores, se trasladó a toda la población de Potrerillos a otras localidades de la región, para convertir a la fundición en un establecimiento de acceso restringido sólo a los trabajadores; con esto la fundición logró adaptar las exigencias del plan de descontaminación al escenario de una zona saturada en la que no existe población, excepto la que trabaja en la fundición en horario laboral, por lo que en DI sería aplicable la legislación correspondiente a las Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo (D.S. N° 594/99).

En la tabla 9.2 se indican los límites permisibles ponderado y temporal para el SO_2 según el Reglamento Chileno sobre las Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo. El límite permisible ponderado *“corresponde al valor máximo permitido para el promedio ponderado de las concentraciones ambientales de contaminantes químicos existentes en los lugares de trabajo, durante la jornada normal de 8 horas diarias, con un total de 48 horas semanales”*. En cambio, el límite permisible temporal se define como *“el valor máximo permitido para el promedio ponderado de las concentraciones ambientales de contaminantes químicos en los lugares de trabajo, medidas en un período de 15 minutos continuos dentro de la jornada de trabajo. Este límite no podrá ser excedido en ningún momento de la jornada”* (BCN, 1999). Según estas dos definiciones, se compara el límite permisible ponderado con las concentraciones de SO_2 medidas en la estación DI, ya que solo se cuenta con datos diarios. Considerando que el rango aceptado es 1600 hasta 4000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (líneas verde en la figura 9.2), en la estación DI se

cumple con el reglamento laboral ambiental, pues durante todo el tiempo los valores están bajo los 4000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pero desde el año 2010 las concentraciones no sobrepasan el límite permisible ponderado mínimo de 1600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, llegando a valores menores a 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 9.2. Límites permisibles para el SO_2 según el Reglamento Chileno sobre las Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo. Fuente: D.S. N° 594/99.

Limite Permisible	Concentración de SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Ponderado	1600 – 4000
Temporal	5000 – 13000

En la figura 9.3 se muestra la fundición y la estación DI. En la imagen se aprecia en color negro y gris oscuro la zona aledaña a la fundición (2 km^2 aproximadamente), este color es producto del carbón, pues desde el año 1927 hasta el 2002 la fundición funcionaba con un horno de reverbero; recién el año 2002 comenzó a operar el horno modificado tipo Teniente, con tecnología más eficiente y que utiliza gasóleo, combustible con menor concentración de azufre que el carbón, pues el primero contiene como límite máximo un 0,005% de S (BCN, 2011) y el segundo entre 2 - 7 % de S (Donoso, 2018). A pesar que se informa del cambio de tecnología (Codelco, 2002), que produce que se utilice un combustible con menor concentración de azufre, esto no se refleja en las concentraciones graficadas en la figura 9.2, lo que hace pensar que a pesar del cambio tecnológico, el combustible utilizado mantiene las concentraciones de azufre.

En la imagen, captada el 26 de enero del 2017, también se aprecia el humo que sale de la chimenea, el cual resulta de un color gris producto de la combustión del combustible y se dirige hacia el este. En la figura 9.4 se muestra la chimenea de la fundición Potrerillos y se aprecia la envergadura de esta chimenea y la cercanía de esta al antiguo poblado de Potrerillos. En la fundición se ve de color negro toda la tierra cercana a esta, producto del carbón utilizado para el funcionamiento de la chimenea.

En relación a las estaciones de la provincia de Chañaral, se descarta que las termoeléctricas contribuyan con los niveles de SO_2 medidas en las estaciones, ya que las más cercanas se encuentran a más de 100 km de distancia: central termoeléctrica San Lorenzo y central Diego de Almagro, funcionan con gasóleo y cuentan con capacidades de 56 y 24 MW.

Se descartan las influencias de los puertos y de los vehículos motorizados. El puerto más cercano está a más de 200 km de las estaciones y el centro urbano más cercano, por donde transitan los vehículos motorizados, es El Salvador, pero está a más de 25 km y tiene 8.697 habitantes. Además, estos vehículos funcionan con gasolina que tiene una baja concentración de azufre correspondiente a 15 ppm como límite máximo (BCN, 2011).

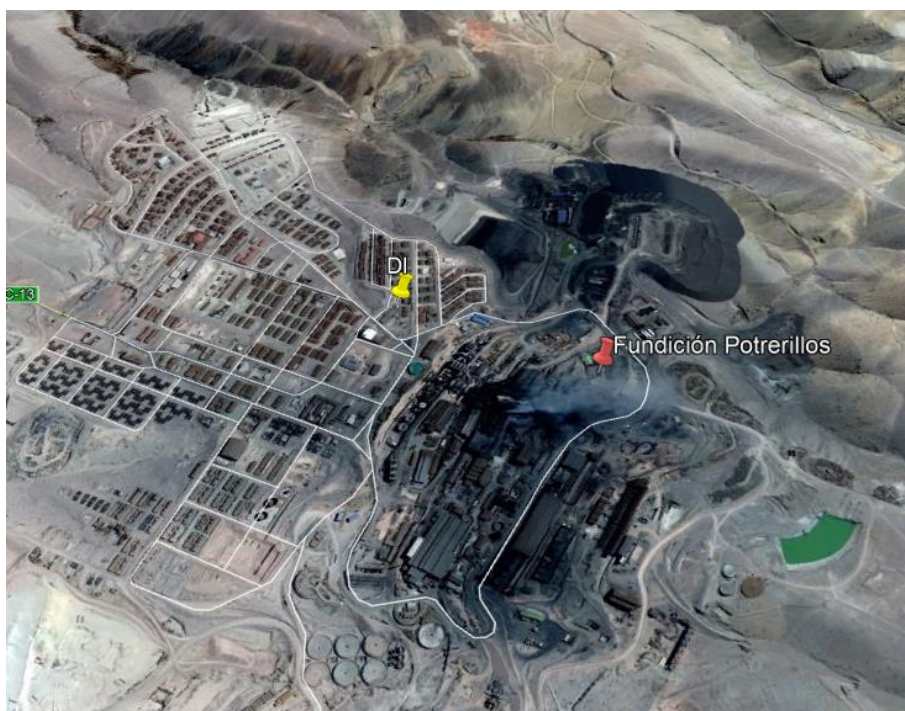


Figura 9.3. Ubicación de la fundición Potrerillos y de la estación DI.



Figura 9.4. Imagen de la chimenea de la fundición Potrerillos.

Las concentraciones diarias de SO_2 se comparan con las normativas: chilena, de la UE y de la OMS, ya que en estas se encuentran los límites diarios para este contaminante. En la figura 9.2, se muestra el valor límite según la normativa chilena (rojo), la UE (negro) y la OMS (amarillo). Según estas gráficas, los 3 valores límites son sobrepasados en ambas estaciones, ya que se superan los $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecidos en Chile, los $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ determinados por la UE y los $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dados por la OMS. Esto se corrobora en las tablas 9.3 y 9.4 que indican la cantidad de días en que los valores límites son superados. En la estación DI, el límite ponderado mínimo comienza

a cumplirse desde el 2009 y el límite ponderado máximo se cumple en todo el periodo analizado, por lo que se cumple con la ley relacionada a las Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo de Chile.

Las concentraciones en la estación DI, como se indicó anteriormente, sobrepasan los límites estipulados por las normas de calidad del aire de Chile, la EPA y la OMS durante todo el período analizado; a pesar de que existe una brusca a principios del año 2010, en donde se pasa de valores sobre los 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a valores por debajo de los 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las concentraciones en la estación CAP también sobrepasan siempre las normativas, durante todos los años analizados (véase la tabla 9.4).

Tabla 9.3. Incidencias diarias desde el año 2001 al 2010 para el SO_2 en la estación DI.

Año	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Chile	108	175	177	187	197	235	183	186	112	126
UE	153	230	256	255	262	291	256	244	176	217
OMS	187	326	348	330	321	333	309	298	263	251
L.P. Min*	22	29	27	23	29	33	26	34	0	0
L.P. Máx**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

*L.P. min: Límite Ponderado Mínimo.

**L.P. máx: Límite Ponderado Máximo.

Tabla 9.4. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2008 y 2010 para el SO_2 en la estación CAP.

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2010
Chile	6	8	25	19	28	22	19	5
UE	20	40	107	86	114	67	55	28
OMS	93	331	334	306	319	266	252	249

En la figura 9.5 y como es de esperar, por los valores diarios analizados anteriormente, se aprecia que las concentraciones anuales de SO_2 en la estación DI sobrepasan el límite anual de la norma de calidad del aire chilena, durante todo el tiempo analizado. De todas maneras, en la estación DI no se aplican las normas de calidad del aire, solo las relativas a riesgos laborales, las cuales no indican un límite anual.

En la estación CAP se sobrepasa el límite anual de la normativa chilena, pero por muy poco y desde el año 2004 al 2007. A pesar de esta superación, no existe un nuevo plan de descontaminación de la fundición Potrerillos, esto puede ser causa de que la fundición se encuentra en una zona aislada de la región y la contaminación está acotada a esa área.

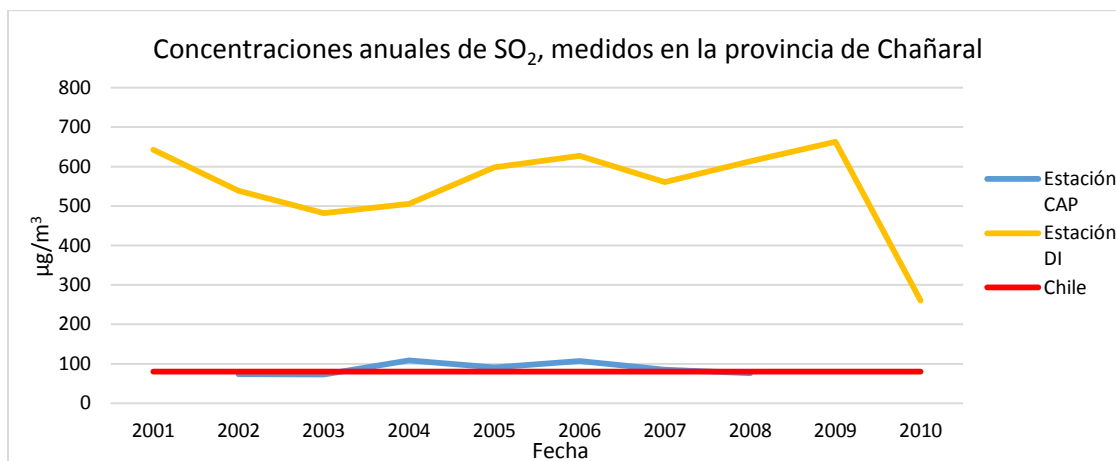


Figura 9.5. Concentraciones anuales de SO₂ en las estaciones CAP y DI, y valor límite de SO₂ según la normativa chilena.

En síntesis se puede indicar que la principal fuente de emisión de SO₂ en la provincia de Chañaral es la fundición Potrerillo y que la estación DI es la que mayor nivel de concentración de este contaminante mide, por este motivo el año 1998 a través del D.S. N° 179/98 se establece el plan de Descontaminación Atmosférica, para limitar las concentraciones de SO₂ y de PM. Codelco previendo que no cumpliría con las Normas de Calidad del Aire de Chile, trasladó a toda la población cercana y dejó el área restringida solo a los trabajadores. Al realizar esta acción la zona se rige por el D.S. N° 594/99 sobre las Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo, en donde el límite permisible ponderado es de 1600 a 4000 µg/m³, en cambio en las Normas de Calidad del Aire Chilenas se estipula el valor límite diario en 250 µg/m³. La eficacia del plan implementado en 1998 no se puede comprobar, ya que los datos validados en este estudio están desde el año 2001 al 2010.

A pesar de que en la estación CAP se sobrepasan los valores límites diarios estipulados por Chile, la UE y la OMS durante todo el tiempo analizado y el límite anual de Chile desde el 2004 al 2007, no se cuenta con otros planes de descontaminación. Esto puede ser porque la contaminación en la fundición Potrerillos es una emisión aislada, la fundición está localizada entre cerros, en el desierto y alejada de los principales centros urbanos; el más cercano está a más de 25 km, corresponde al asentamiento minero El Salvador, que tiene 8.697 habitantes y a más de 50 km está Diego de Almagro con 7951 habitantes. De igual forma es importante implementar un nuevo plan de descontaminación atmosférica en la zona, que incluya la instalación como mínimo de dos estaciones de monitoreo de la calidad del aire, una en la ciudad de El Salvador y la otra en Diego de Almagro, ya que no es posible que los niveles de SO₂ resulten tan altos, pues las consecuencias para la salud de las personas que están expuestas a estos niveles de concentración de SO₂ son graves.

Las concentraciones de SO₂ en DI y en CAP se mantienen casi constantes en el tiempo, esto se comprueba porque el promedio y desviación son muy similares en cada estación. Solo en DI y en el año 2010 existe una baja significativa en las concentraciones, que no puede afirmarse sea una tendencia, porque no se cuenta con datos en los siguientes años. Tampoco fue posible determinar la causa de esta reducción en los niveles de SO₂ y se plantean como hipótesis la

disminución en la concentración de S en el combustible o la implementación de nueva tecnología en la captación de SO₂.

Provincia de Copiapó

Se encuentran seis estaciones que miden concentración de SO₂: Copiapó (C), Los Volcanes (LV), Paipote (Pai), San Fernando (SF), Pabellón (Pab) y Tierra Amarilla (TA). Todas pertenecen a la compañía ENAMI, empresa de propiedad estatal. La mayoría son urbanas, a excepción de la estación Pabellón que es rural.

Como se muestra en la figura 9.6, las estaciones C, LV y SF se encuentran en la ciudad de Copiapó, emplazamiento con la mayor cantidad de habitantes de la región (153.937 habitantes) y capital de la misma.

La estación C se ubica a menos de 200 m de la avenida Circunvalación, a más de 9 km al noroeste de la fundición Hernán Videla Lira (propiedad de ENAMI), a más de 18 km al norte de la mina a cielo abierto La Candelaria y a más de 14 km al noreste de las centrales termoeléctricas Cenizas, Termopacífico y Tierra Amarilla.

La estación LV se ubica a menos de 200 m de la avenida Los Loros, a más de 2,7 km hacia el sureste de la estación C, a casi 7 km al noroeste de la fundición, a más de 17 km al norte de la mina La Candelaria y a 15 km aproximadamente al noreste de las centrales termoeléctricas.

SF se localiza en el sector sur de la ciudad, entre las avenidas Los Carreras y Copayapu, a casi 5 km al noroeste de la fundición, 15 km al norte de la mina La Candelaria y a más de 13 km aproximadamente al noreste de las centrales termoeléctricas.

Pai se encuentra al sureste de la ciudad de Copiapó, en la localidad de Paipote, a 1 km aproximadamente al noroeste de la fundición, a más de 13 al noreste de las termoeléctricas y la mina.

La estación TA se localiza en la ciudad de Tierra Amarilla (14.019 habitantes), a 6 km al sur de la fundición, a 7 km al noreste de la mina y a más de 11 al este de las centrales termoeléctricas.

Finalmente la única estación de tipo rural, Pab, se ubica a más de 25 km al sur de la fundición, a más de 15 km al sureste de la mina y a más de 23 km al sureste de las centrales.

Para un mejor análisis se separaron los gráficos de las seis estaciones y se representaron las concentraciones diarias de SO₂ en función del tiempo (véase la figura 9.7).



Figura 9.6. Ubicación de las ciudades de Copiapó y Tierra Amarilla (rojo con punto negro), de la fundición Hernán Videla Lira (rojo), de las centrales termoeléctricas (azul), de la mina La Candelaria (verde) y de las estaciones: C, LV, SF, Pai, TA y Pab (amarillo).

En la figura 9.7 se aprecia que las concentraciones comienzan a bajar entre los años 1997 y 1999, y luego se mantienen constantes hasta el año 2009. Esta disminución en las concentraciones se debe al cambio en el combustible utilizado en la fundición, ya que desde el año 1952 hasta 1998 la fundición funcionaba con un horno reverbero que utilizaba carbón, pero desde el año 1998 y hasta la actualidad la planta opera con el Convertidor Teniente que funciona con gasóleo. El carbón utilizado en Chile tiene entre un 2 a 7 % de S (Donoso, 2018) y el gasóleo 0,005 % como límite máximo (BCN, 2011), por lo que es importante señalar que el cambio de combustible produjo reducciones en la concentración de SO_2 . La disminución en las concentraciones se produce por las acciones llevadas a cabo producto del plan de Descontaminación aprobado el año 1995, a causa de que se declaran en el año 1993 como zonas saturadas por SO_2 a las localidades de Tierra Amarilla, Pabellón, San Fernando y Estación Paipote. Las principales acciones del plan de Descontaminación se indican en la tabla 8.1, pero destaca la sustitución del horno reverbero que utilizaba carbón por el horno tipo teniente que usa gasóleo.

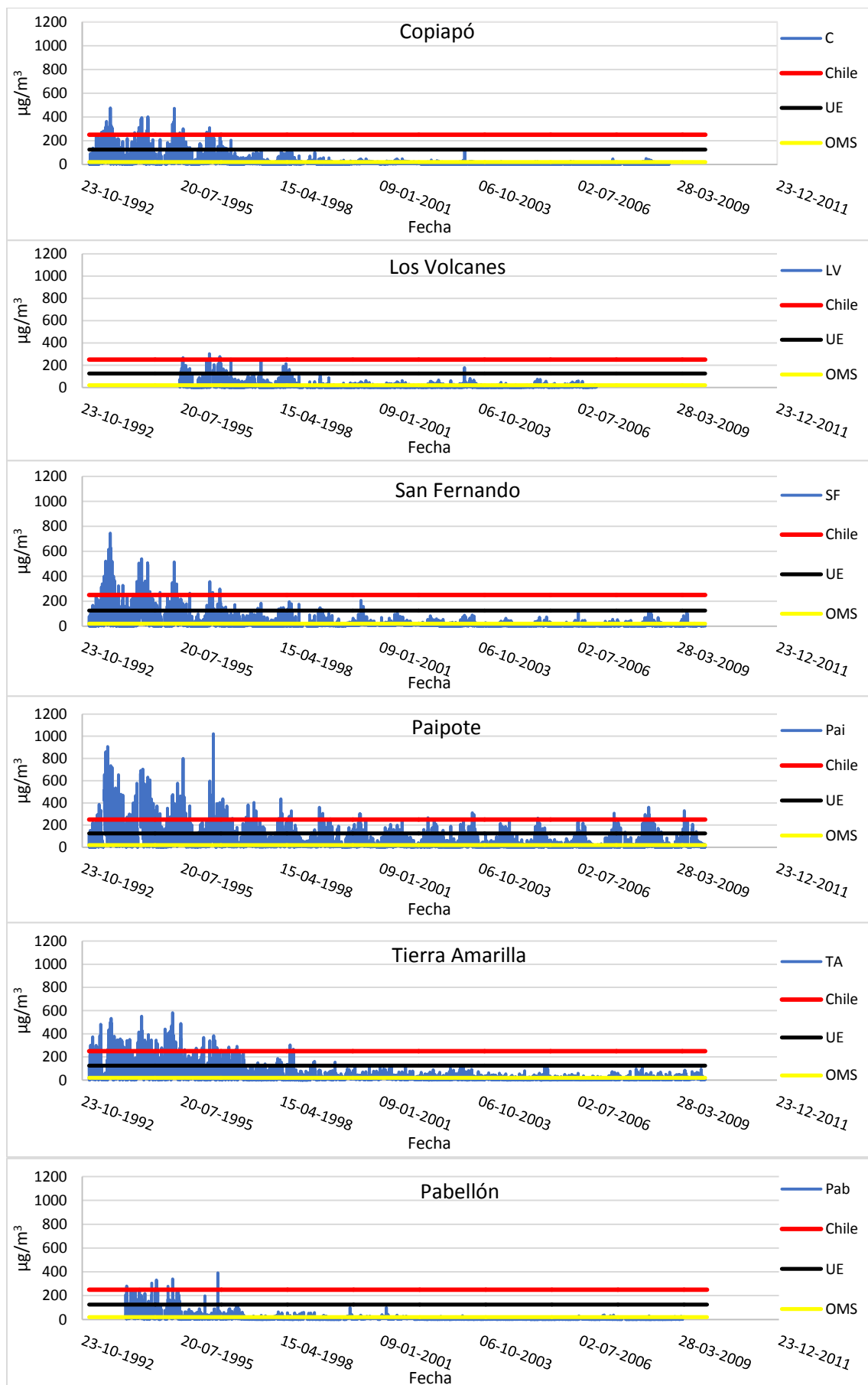


Figura 9.7. Concentraciones diarias de SO₂ en las estaciones: C, LV, SF, Pai, Pab y TA.

En las seis estaciones se produce un comportamiento cíclico anual de las concentraciones durante todos los años analizados. Los mayores valores se producen entre junio y septiembre, correspondientes al período invernal y otoñal. Los valores más bajos se dan durante el período estival y primaveral (octubre a mayo). Esto es producto de que en la época de invierno y como la zona analizada está en los valles, los gases se dispersan menos, pues las condiciones meteorológicas como las bajas temperaturas, la baja velocidad del viento y la capa de inversión térmica cercana a la superficie producen que los gases permanezcan estables en la baja atmósfera. Esta situación mejora en primavera y verano, ya que las condiciones atmosféricas (las altas temperaturas, las mayores velocidades del viento y la capa de inversión térmica con más altura) dispersan de mejor forma los contaminantes.

En la figura 9.8 se muestra una imagen de la fundición Hernán Videla Lira en el año 2011, en esta se aprecia el humo de la chimenea el cual tiene un color gris producto de la quema del combustible fósil.



Figura 9.8. Vista de la fundición Hernán Videla Lira. Fuente: SEREMI de Salud Atacama, 2011.

En la estación C los datos validados están entre los años 1993 al 2008, el rango va de 0 a 476 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 21,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación estándar es de 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (véase la tabla 9.5). En LV, los datos validados están entre los años 1995 al 2006, el rango está entre 0 a 303 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 13,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación es de 26,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En SF, los datos validados están entre los años 1993 al 2009 y los valores van desde el 0 a 746 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación es de 58,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En Pai, las concentraciones de SO_2 durante los años 1993 al 2009 están entre 0 a 1022 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 61,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación de 96,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones en Pab durante los años 1994 al 2009 están entre 0 a 392 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 11,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación resultó en 26,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por último, la estación TA cuenta con datos validados entre los años 1993 al 2009, el rango está entre 0 a 582 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 39,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación es de 61,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 9.5. Rango, promedio y desviación estándar en las estaciones C, LV, SF, Pai, TA y Pab.

Provincia	Estación	Rango [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Desviación estándar [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Copiapó	C	0 – 476	21,7	45
	LV	0 – 303	13,2	26,3
	SF	0 – 746	28	58,7
	Pai	0 – 1022	61,2	96,9
	TA	0 – 582	39,9	61,6
	Pab	0 – 392	11,7	26,2

Al comparar el promedio y la desviación estándar de cada estación, se verifica que son diferentes. En todas las estaciones la desviación es mucho mayor que el promedio (la mayoría 2 veces mayor), esto es porque los niveles de SO_2 cambian a lo largo del tiempo analizado.

La estación que tiene las concentraciones más altas es la estación Pai. En términos de promedio, le sigue la estación TA y luego SF. En cuarto lugar queda la estación C, seguida de la estación LV y Pab, ambas con promedios cercanos ($13,2$ y $11,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Este orden se debe a la ubicación de las estaciones, pues mientras más cerca este la estación de la fundición, los valores son más altos. Como se indicó anteriormente, la estación Pai está a 1 km de la fundición Hernán Videla Lira, la TA está alrededor de 6 km de dicha fundición y SF a 5 km. C y LV están alrededor de 9 y 7 km, respectivamente. Y la que menores valores de concentraciones tiene, Pab, está a más de 25 km de la fundición.

Otro factor que influye en las medidas de las concentraciones es la dirección del viento, pues como se indicó en el apartado 3.7 el viento en el valle dispersa los contaminantes mayoritariamente hacia el norte (40%), noreste (30%) y hacia el sur (12%). A pesar que Pai está en dirección noroeste de la fundición, en donde el viento se mueve el 8% del año, las concentraciones son altas por su cercanía. C, LV y SF también se ubican hacia el noroeste de la fundición, pero producto de su mayor distancia a esta, las concentraciones son mucho más bajas que en Pai.

En cuanto a TA y Pab, ambas se ubican al sur de la fundición donde el viento sopla alrededor de un 12% del año, entonces, es por eso que a pesar que SF está 1 km más cerca que TA de la fundición, las concentraciones son más altas en TA, pues el viento dispersa más los contaminantes hacia TA que hacia SF. Finalmente, las concentraciones son más bajas en Pab que en TA, porque a pesar que están en la misma dirección, la distancia a la fundición es mayor en Pab.

Que las concentraciones de SO_2 sean altas en la zona se debe básicamente a la fundición Hernán Videla Lira, esto se ratifica ya que durante el año 1993 se declaró zona saturada por SO_2 a las localidades de Tierra Amarilla, Pabellón, San Fernando y Estación Paipote a través del D.S. N° 255/1993 (BCN, 1993). Por esta razón, en 1995 la fundición Hernán Videla Lira elaboró un plan de descontaminación, el cual fue aprobado por el Decreto Supremo N° 180/1995 (BCN, 1995).

En estas 6 estaciones se descarta la influencia del puerto más cercano (puerto de Caldera) en la emisión de SO_2 , puesto que está a más de 60 km de la estación más próxima. También se excluye la influencia de las centrales termoeléctricas, pues las más cercanas están a 12 km, ya que todas

funcionan con gas natural, combustible con baja concentración de azufre (límite máximo de 10 ppm, según el decreto N° 60) y sus capacidades son bajas: 143 MW para Tierra Amarilla, 86 MW para Termopacífico y 16 MW en Cenizas.

La mina subterránea más cercana es La Candelaria y está a más de 7 km de las estaciones, por lo que tampoco podría considerarse una gran fuente de emisiones de SO₂, pues su principal emisión es de PM.

Otras fuentes de emisiones antropogénicas de SO₂, son las calefacciones domésticas y el tráfico de vehículos. La calefacción es utilizada por algunos hogares principalmente en los meses de junio, julio y agosto, en donde las mínimas en promedio descienden hasta los 8°C (como se indicó en el apartado 3.5). Debido a esto y a la escasa población se descarta la influencia de la calefacción doméstica en las concentraciones de SO₂ medidas en las estaciones, pues Copiapó cuenta con 153.937 habitantes y Tierra Amarilla con 14.019 habitantes.

Lo mismo sucede con el tráfico de vehículos, también se descarta, pues como se indicó en el apartado 3.9 el parque de vehículos motorizados en la región de Atacama es de 91.523, lo que corresponde al 2% nacional, de los cuales 4.754 vehículos son no catalíticos y 86.769 son catalíticos o a gas, por lo que la cantidad de vehículos es limitada y la concentración de azufre en los combustibles utilizados también lo es. En Chile los vehículos motorizados utilizan gasolina, la cual tiene 15 ppm de concentración de S como límite máximo, según el D. S. N° 60.

En cuanto a la ubicación y meteorología, resulta lógico pensar que si se ubica una estación hacia la dirección norte o noreste y cercana a la fundición, las concentraciones de SO₂ resultarían más altas que los valores registrados en Pai. Pero la ubicación de la estación Pai se debe a que hacia esa dirección se encuentran la localidad de Paipote y las ciudades de Tierra Amarilla y Copiapó. Esto se comprueba en la figura 9.9, en la imagen se ve que los contaminantes se dispersan hacia el norte y noreste de la fundición, ya que se ve claramente un color negro y gris oscuro en la tierra producto de la quema de los combustibles fósiles, especialmente carbón.

En la comparación de las concentraciones diarias de SO₂ con las normativas: chilena, de la UE y de la OMS (véase la figura 9.5 y las tablas 9.6, 9.7, 9.8, 9.9, 9.10 y 9.11). Las estaciones C, LV, SF y Pab no cumplen con la normativa chilena hasta el año 1996, la estación TA hasta el año 1998 y Pai sobrepasa dicha normativa durante casi todo el periodo analizado, excepto en el año 2001 y 2006. En cuanto a la normativa europea, esta se cumple a partir del año 1997 en la estación C, desde el año 1999 en LV, desde el 2001 en SF, desde 1997 en la estación Pab y desde el 2001 en TA. En contraste, en la estación Pai, se sobrepasa la normativa europea durante todo el periodo de tiempo analizado. Finalmente el valor límite de la OMS, es sobrepasado en las 6 estaciones, pues de los tres límites este es el más estricto.



Figura 9.9. Vista de la fundición Hernán Videla Lira y sus alrededores.

Tabla 9.6. Incidencias diarias desde el año 1993 al 2008 para el SO₂ en la estación C.

Año	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Chile	19	11	7	3	0	0	0	0
UE	88	60	43	31	0	0	0	0
OMS	221	207	208	214	128	80	48	51
Año	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0
UE	0	0	0	0	0	0	0	0
OMS	48	8	11	1	2	2	3	12

Tabla 9.7. Incidencias diarias desde el año 1995 al 2006 para el SO₂ en la estación LV.

Año	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Chile	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UE	10	19	2	7	0	0	0	0	1	0	0	0
OMS	96	156	109	96	26	43	43	30	47	12	43	42

Tabla 9.8. Incidencias diarias desde el año 1993 al 2009 para el SO₂ en la estación SF.

Año	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Chile	56	30	5	3	0	0	0	0	0
UE	133	114	52	24	3	10	4	6	0
OMS	237	240	208	178	135	90	89	85	82
Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	
UE	0	0	0	0	0	0	0	0	
OMS	54	54	13	32	25	28	52	33	

Tabla 9.9. Incidencias diarias desde el año 1993 al 2009 para el SO₂ en la estación Pai.

Año	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Chile	95	89	53	30	6	6	3	2	0
UE	182	182	137	113	55	42	28	24	16
OMS	280	274	288	263	238	224	219	157	170
Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2002
Chile	1	1	1	1	0	1	6	3	1
UE	22	22	10	17	13	21	35	18	22
OMS	146	146	109	115	113	101	153	148	146

Tabla 9.10. Incidencias diarias desde el año al 1993 al 2009 para el SO₂ en la estación TA.

Año	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Chile	42	35	28	8	2	2	0	0	0
UE	136	124	122	80	22	20	3	1	0
OMS	296	291	317	290	210	188	160	146	165
Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	
UE	0	0	0	0	0	0	0	0	
OMS	65	128	69	67	46	50	88	102	

Tabla 9.11. Incidencias diarias desde el año 1994 al 2009 para el SO₂ en la estación Pab.

Año	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Chile	6	3	1	0	0	0	0	0
UE	34	23	2	0	0	0	0	0
OMS	237	166	122	50	41	19	26	35
Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0
UE	0	0	0	0	0	0	0	0
OMS	3	3	0	0	2	7	2	2

En la figura 9.10 se grafican los valores anuales de SO₂ en la provincia de Copiapó y se compara con la normativa chilena. Esta se cumple durante todo el periodo analizado en las estaciones C, LV y Pab, pero no se cumple en la estación Pai y TA hasta el año 1996. En la estación SF se sobrepasa el límite establecido hasta el año 1994. Al observar la gráfica, se aprecia que existe una tendencia a la baja desde el año 1993, pero desde el año 1995 la baja es más pronunciada y a partir de 1998 los valores tienden a mantenerse estables, esta baja en las concentraciones se debe al plan de descontaminación implementado.

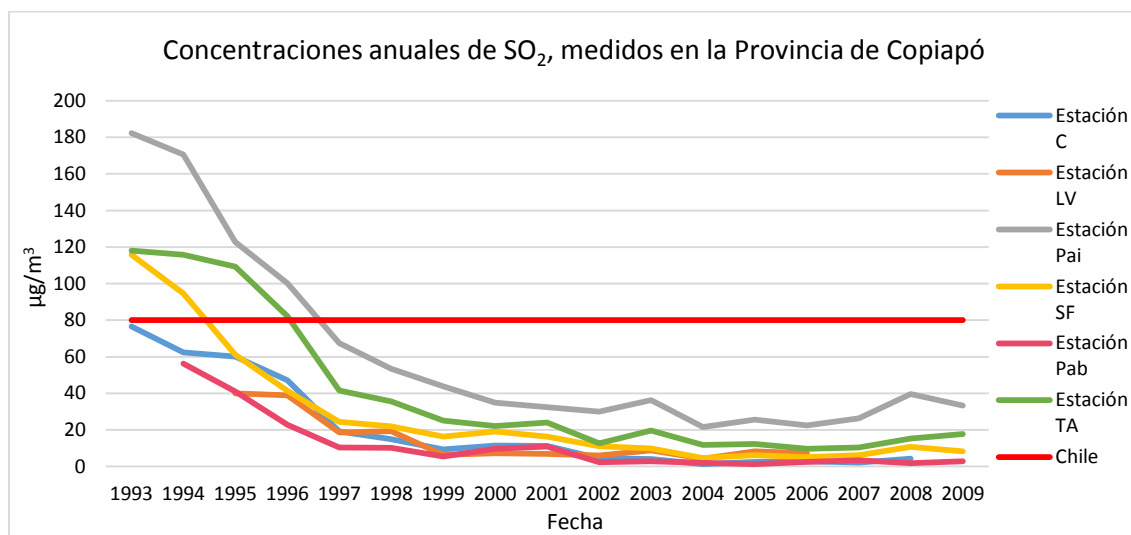


Figura 9.10. Concentraciones anuales de SO₂ en las estaciones C, LV, Pai, SF, Pab y TA y valor límite de SO₂ según la normativa chilena.

La principal fuente de emisión de SO₂ en la provincia de Copiapó es la fundición Hernán Videla Lira y la estación Pai es la que mayor nivel de este contaminante mide. Las estaciones sobrepasaron el límite diario establecido por Chile hasta el año 1998 aproximadamente, el establecido por la UE es sobrepasado hasta el año 2001 y el valor indicado por la OMS es sobrepasado por todas las estaciones durante todo el periodo analizado (1993 al 2009). El límite anual se comienza a cumplir en todas las estaciones desde el año 1997.

En esta provincia se puede notar que las concentraciones de este contaminante bajaron notoriamente gracias al plan implementado. Si en la actualidad los niveles se mantienen como en el 2009, sería recomendable realizar otro plan de descontaminación para la fundición, pues según el valor guía de la OMS la población cercana tiene riesgos en su salud.

Al comparar el promedio y la desviación estándar por estación se verifica que son diferentes, siendo en la mayoría la desviación 2 veces mayor que el promedio. Esta diferencia indica que las concentraciones de SO₂ varían a través del tiempo en todas las estaciones, ya que desde el año 1993 al 1999 las concentraciones bajan y luego se mantienen aproximadamente constantes hasta el año 2009.

Provincia de Huasco

En esta provincia es donde más estaciones de medida de calidad del aire se encuentran en la región; se localiza un total de 11 estaciones que miden concentración de SO_2 : EME F (F), EME M (M), EME ME (ME), SM1 Vertedero (SM1), SM2 Quinta La Rosa (SM2), SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo (SM3), SM4 Carretera km 40 (SM4), SM5 Parcela 5 El Pino (SM5), SM6 Parcela Buena Esperanza (SM6), SM7 Los Loros (SM7) y SM8 Freirina (SM8). Todas pertenecen a la Compañía Eléctrica Guacolda, empresa privada. Las estaciones F, M, ME son urbanas, SM1 es industrial y SM2, SM3, SM4, SM5, SM6, SM7 y SM8 son rurales. En la figura 9.11 se indican las ubicaciones de las estaciones, de los principales asentamientos urbanos, del puerto de Huasco y de las centrales termoeléctricas.



Figura 9.11. Ubicación del pueblo de Freirina y de la ciudad de Huasco (rojo con punto negro), del puerto de Huasco (barco azul), de las centrales termoeléctricas (azul) y de las estaciones: F, M, ME, SM1, SM2, SM3, SM4, SM5, SM6, SM7 y SM8 (amarillo).

Para que el análisis resulte más comprensible se realizaron gráficos para cada estación, los cuales están representados en las figuras 9.12 y 9.13, en donde se muestran las concentraciones diarias de SO_2 en función del tiempo en 10 de las 11 estaciones ubicadas en la provincia de Huasco, ya que en la estación ME no fue posible validar los datos, porque no se cuenta con el 75% de estos.

Todas las concentraciones de las figuras 9.12 y 9.13 no son altas, están por debajo del valor límite estipulado por Chile y en casi todas las estaciones tampoco se superan el valor límite de la UE, excepto en SM7 el año 2007. En cambio, el valor indicado por la OMS es superado en todas las estaciones, durante todo el tiempo analizado.

En la mayoría de las estaciones hay un comportamiento cíclico anual en las concentraciones; los valores más altos se registraron en otoño e invierno, esto porque los gases se dispersan menos, pues las condiciones meteorológicas como las bajas temperaturas, la baja velocidad del viento y la capa de inversión térmica cercana a la superficie producen que los gases permanezcan estables en la baja atmósfera. Esta situación mejora en primavera y verano, ya que las condiciones atmosféricas dispersan mejor los contaminantes.

En las estaciones M, SM2, SM3, SM4, SM5 y SM6, las concentraciones se mantienen aproximadamente constante en el tiempo. En cambio en F y SM1 hay un aumento en los últimos años de medida: 2008 al 2010, en SM7 el aumento se produce entre el año 2007 y 2008, y en SM8 el aumento es desde el 2009 al 2010. Como desgraciadamente solo se cuenta con datos validados hasta el 2010, no es posible saber si la tendencia es al alza.

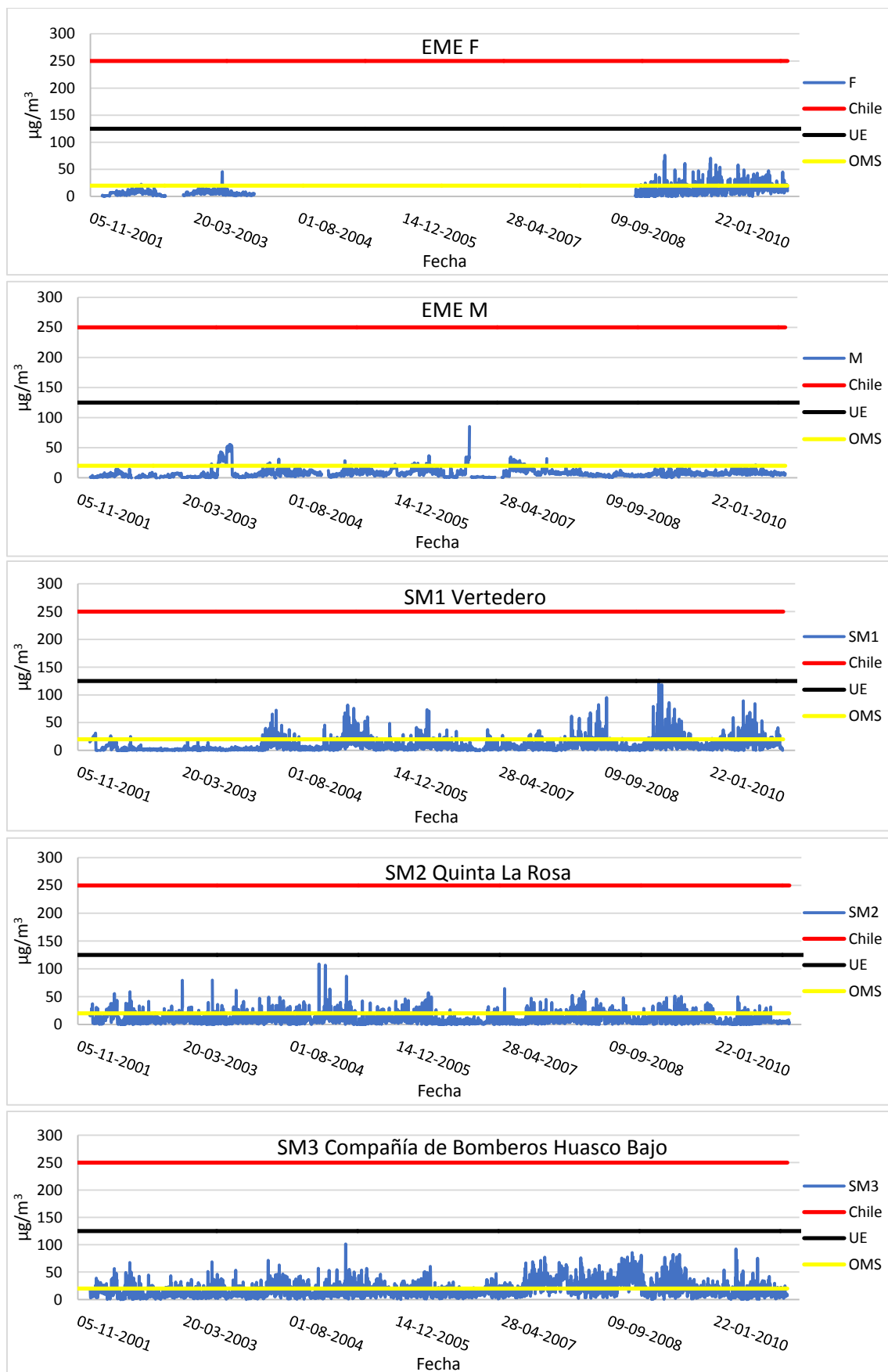


Figura 9.12. Concentraciones diarias de SO₂ en las estaciones: F, M, SM1, SM2 y SM3.

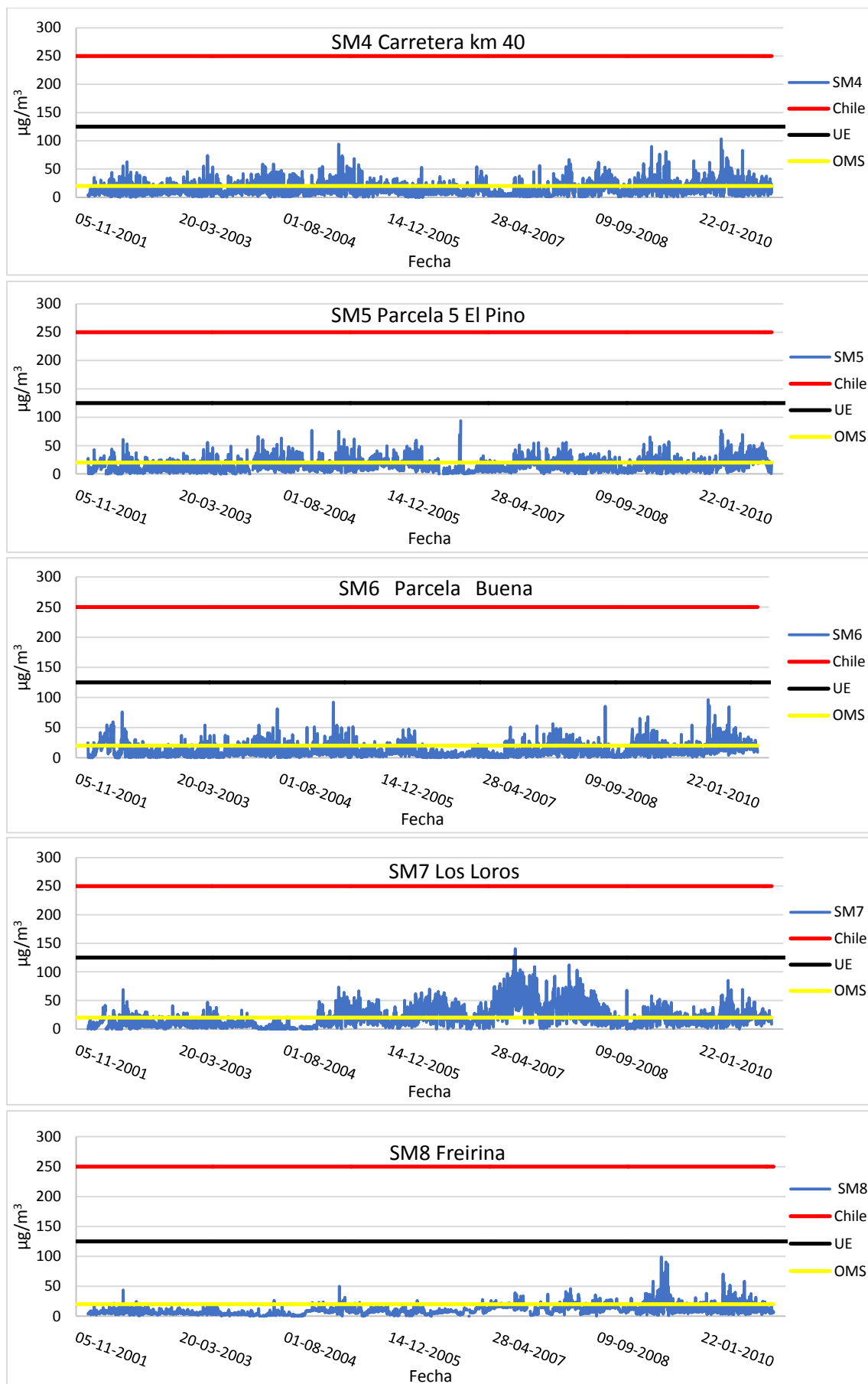


Figura 9.13. Concentraciones diarias de SO₂ en las estaciones: SM4, SM5, SM6, SM7 y SM8.

Las estaciones urbanas F y M están en la ciudad de Huasco (10.149 habitantes) a poco más de 500 metros de distancia; las ubicaciones son para poder monitorear el centro urbano más cercano a las centrales térmicas. La primera está más cercana al mar a 28 m s. n. m., y la segunda se encuentra en un ángulo de inclinación de 24° y a 56 m s. n. m. Ambas se ubican a 2 km al este del puerto, y a poco más de 3 km al este de las centrales termoeléctricas: Guacolda, Huasco TG y Huasco Vapor. Para F, los datos validados están en los años 2002, 2003, 2009 y 2010; las concentraciones en esos años, tal y como se indican en la tabla 9.12, van de 0 a 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio resultó de 10,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación estándar de 9,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto a la estación M, los datos validados están entre los años 2001 al 2006 y entre el 2009 al 2010. En esas fechas las concentraciones de SO_2 van de 0 a 119 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 11,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación estándar de 13,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (véase la tabla 9.12).

La estación SM1 está ubicada al suroeste de la ciudad de Huasco (alrededor de 4 km), al suroeste del puerto (3,5 km), a más de 2 km al suroeste de la central Termoeléctrica Huasco Vapor, a 3,5 km al sur de la central Huasco TG y a más de 4 km al sur de la central Guacolda. Las concentraciones validadas están entre los años 2002 al 2010, el rango de concentraciones es de 0 a 127 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio resultó de 9,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación de 12,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las estaciones SM2, SM3, SM4, SM5, SM6, SM7 y SM8 están entre cerros, se ubican en el valle de Huasco y los datos validados están entre los años 2002 al 2010. Están cercanas unas de otras; la estación SM2 está a 800 metros de SM3, SM3 está a 300 metros de SM4, SM4 a 3 km de SM5, SM5 a 2,8 km de SM6, SM6 a 3 km de SM7 y SM7 a 2 km de SM8. Por la cercanía de las estaciones, se puede presumir que las concentraciones son similares.

SM2 está ubicada a 3 km al este de la ciudad de Huasco, a 6 km al noreste del puerto, a 7 km al noreste de las centrales termoeléctricas Huasco Vapor y Huasco TG, y a más de 7 km al este de la central Guacolda. Las concentraciones validadas están en el rango de concentraciones de 0 - 109 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio resultó de 10,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación de 10,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

SM3 se localiza a 4 km al este de la ciudad de Huasco, a 6 km al este del puerto, a más de 7 km al noreste de las centrales termoeléctrica Huasco Vapor, a casi 7 km al este de la central Huasco TG y a 8 km al sureste de la central Guacolda. Las concentraciones validadas van de 0 a 101 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 18,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación de 14,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La estación SM4 está emplazada a 4 km al este de la ciudad de Huasco, a 6 km al este del puerto, a más de 7 km al noreste de la central termoeléctrica Huasco Vapor, a casi 8 km al este de la central Huasco TG, y a 8 km al sureste de la central Guacolda. El rango de concentraciones esta entre 0 y 103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio resultó de 15,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación de 12,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La estación SM5 está ubicada a 7 km al este de la ciudad de Huasco, a 10 km al sureste del puerto, a más de 10 km al este de la central termoeléctrica Huasco Vapor, a 11 km aproximadamente al sureste de la central Huasco TG y de Guacolda. Las concentraciones validadas están entre 0 y 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio resultó de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación de 11,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

SM6 se localiza a 9 km al sureste de la ciudad de Huasco, a 12 km al sureste del puerto y de la central termoeléctrica Huasco Vapor, a más de 13 km al sureste de las centrales Huasco TG y Guacolda. Las concentraciones validadas están entre 0 y 96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 11,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación de 10,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

SM7 se emplaza a 11 km al sureste de la ciudad de Huasco, a 15 km aproximadamente al sureste del puerto y de Huasco Vapor, a 16 km al sureste de la central Huasco TG y de Guacolda. El rango de concentraciones es de 0 a 141 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio resultó de 20,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación de 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La estación SM8 está ubicada a 14 km al sureste de la ciudad de Huasco, a más de 16 km al sureste del puerto, de Huasco Vapor, de la central Huasco TG y de la central Guacolda. El rango de concentraciones va de 0 a 99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 10,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación de 8,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Al comparar los promedios y las desviaciones por estación, se aprecia que la diferencia es baja, esto es porque los datos en cada estación se mantienen aproximadamente constantes en el tiempo, a excepción del ciclo anual mencionado anteriormente

Tabla 9.12. Rango, promedio y desviación estándar en las estaciones F, M, SM1, SM2, SM3, SM4, SM5, SM6, SM7 y SM8.

Provincia	Estación	Rango [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Desviación estándar [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Huasco	F	0 – 76	10,1	9,4
	M	0 – 119	11,2	13,1
	SM1	0 – 127	9,2	12,1
	SM2	0 – 109	10,3	10,1
	SM3	0 – 101	18,1	14,4
	SM4	0 – 103	15,1	12,2
	SM5	0 – 94	15	11,3
	SM6	0 – 96	11,8	10,9
	SM7	0 – 141	20,5	19
	SM8	0 - 99	10,1	8,1

Las estaciones urbanas F y M presentan promedios similares. En la estación F las concentraciones son más bajas que en M, a pesar de la poca distancia de separación. Esto puede ser por la cercanía de F al mar, situación que produce que los contaminantes dispersen mejor, en cambio, M está a más altura que F y más lejos del mar. Otro factor que influye en que la estación F presente más bajas concentraciones de SO_2 , es porque se ubica al este de la Termoeléctrica Guacolda y hacia esa dirección el viento se direcciona menos de un 1%. En cambio la estación M está hacia el sureste de Guacolda, en donde el viento es direccionado más frecuentemente (4% aproximadamente). La Termoeléctrica Guacolda es la mayor fuente de contaminación de la zona, producto de su alta capacidad y porque funciona a carbón.

Como se explica en el apartado 3.7, en los puertos el viento está direccionado mayoritariamente hacia el sur-suroeste, suroeste, oeste-suroeste y oeste. También existe viento en las otras direcciones, pero con frecuencias mucho más bajas. Esto explica el por qué las concentraciones son más bajas en M y F que en SM1, pues las 2 primeras se ubican en dirección este de las centrales y del puerto, en donde el viento sopla a menor velocidad (2 – 6 m/s) y con menor frecuencia. En cambio SM1 está en la dirección sur de las centrales y del puerto, en donde el viento sopla un 28% del año y las velocidades están entre 2 a más de 10 m/s.

Tanto los rangos como los promedios de las concentraciones de SO_2 son similares para las estaciones SM2, SM3, SM4, SM5, SM6, SM7 y SM8, las cuales son rurales y se ubican entre cerros. Los rangos están entre 0 y $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los promedios entre 10,3 y $20,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para todas las estaciones analizadas, las concentraciones de SO_2 son bajas, pues se ubican en dirección donde el viento no se mueve mayormente, pues todas las estaciones están hacia el este de las centrales termoeléctricas y del puerto. A pesar de que el viento no se mueva con tanta frecuencia en esa dirección, es importante monitorear esa zona, ya que alrededor existe población.

Los valores más altos se producen en la estación SM7, esto puede ser por la ubicación de esta estación, la cual está más cercana al cerro, lo que puede ocasionar que los contaminantes permanezcan ahí y les resulta más difícil dispersar, tanto por la geografía como por la dirección del viento. En SM8 el promedio de concentración está entre los valores más bajos de la zona, por lo que resultaría lógico pensar que si se avanza hacia el sureste las concentraciones deberían seguir disminuyendo. De todas formas, esta hipótesis debería ser validada instalando una estación en la ciudad de Vallenar, a pesar que esta ciudad está a más de 50 km de las centrales y del puerto. Dependiendo de las concentraciones de SO_2 en la ciudad de Vallenar sería necesario instalar una estación en Alto del Carmen, aunque esta localidad está a 80 km de las fuentes de emisión de SO_2 .

Se descarta la influencia de la mina a cielo abierto Los Colorados, porque se encuentra a más de 50 km de las estaciones y en dirección noreste (desfavorecida por la dispersión de contaminantes). Por lo que en este caso, se cree que la presencia de SO_2 puede proceder del puerto de Huasco, el cual movilizó 10.989.605 toneladas métricas durante el año 2016 (7,6% del total nacional) y a las centrales termoeléctrica, especialmente de Guacolda, ya que opera a carbón y tiene una capacidad de 760 MW. Entre las termoeléctricas, también deben contribuir con la presencia de SO_2 las centrales Huasco Vapor y Huasco TG, la primera tiene una baja capacidad (16 MW), pero funciona a carbón y la segunda cuenta con una mayor capacidad (64 MW), pero funciona a gasóleo, combustible con menor concentración de S, si se compara con el carbón.

En la zona se pueden encontrar cerros sobre los 100 metros de altura (marcado en azul en la figura 9.12) y sobre los 400 metros (marcados en rojo en la figura 9.14), la contaminación queda retenida en la zona baja de los cerros, ya que el viento va hacia esa zona y por la altura de las elevaciones los contaminantes no logran pasar en su totalidad. En amarillo se indican las zonas negras o gris oscuro, que es donde queda retenido el hollín, producto de la quema de combustible fósil, especialmente carbón; estas áreas son de aproximadamente 900 y 1400 m^2 .

Es importante notar que no se cuenta con datos validados para la estación ME, la cual sería importante de analizar, ya que es la más cercana a las termoeléctricas y al puerto (véase la figura 9.15), especialmente a la mayor fuente de emisión de contaminantes: central termoeléctrica Guacolda. Esta estación, al ubicarse a 300 m de distancia al suroeste de Guacolda, debiera ser la que contenga los registros más altos de concentraciones de SO_2 , pues la dirección del viento favorecería la dispersión de los contaminantes.

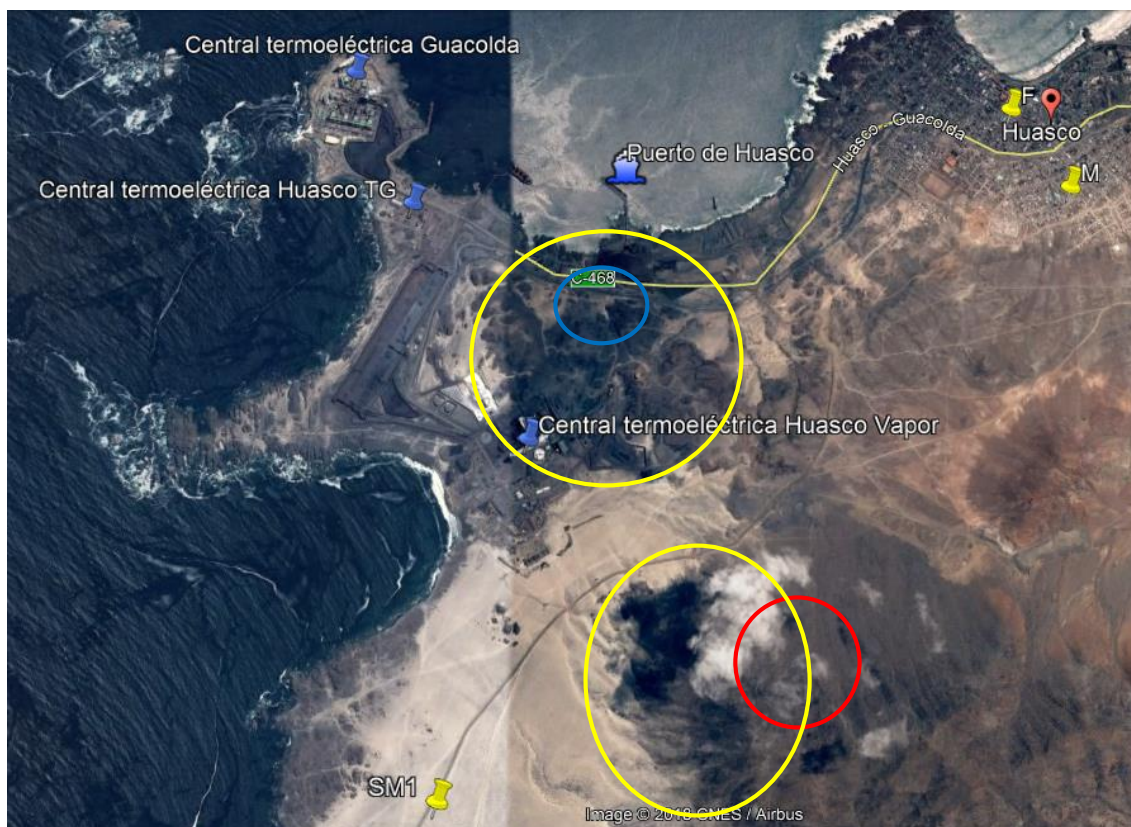


Figura 9.14. Ubicación de la ciudad de Huasco (rojo con punto negro), del puerto de Huasco (barco azul), de las centrales termoeléctricas (azul) y de las estaciones: F, M y SM1 (amarillo).



Figura 9.15. Ubicación de las centrales termoeléctricas (azul), de la estación ME (amarillo) y del puerto de Huasco (barco azul).

Se comparan las concentraciones diarias de SO_2 con los valores límites establecidos por la ley chilena, la UE y la OMS (figuras 9.10 y 9.11 y tablas desde la 9.13 a la 9.22). En todas las gráficas y tablas se aprecia que la normativa chilena se cumple, pues los valores están bajo los $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso del valor límite dispuesto por la UE ($125 \mu\text{g}/\text{m}^3$) esta concentración se sobrepasa en 1 ocasión en la estación SM1 el año 2009, por lo que se cumple con el requisito que establece la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, en donde se indica que no podrá

superarse los 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ más de 3 veces por año civil. Ese valor también se supera 2 veces el año 2007 en la estación SM7, cumpliendo con la normativa europea, ya que se supera menos de 3 veces en el año. El valor guía que entrega la OMS, se sobrepasa en todas las estaciones de la provincia de Huasco y durante casi todo el tiempo, excepto en el año 2003 en la estación SM1 y los años 2006 y 2007 en SM6.

Tabla 9.13. Incidencias diarias los años 2002, 2003, 2009 y 2010 para el SO_2 en la estación F.

Año	2002	2003	2009	2010
Chile	0	0	0	0
UE	0	0	0	0
OMS	2	4	56	91

Tabla 9.14. Incidencias diarias desde el año 2001 al 2006 y los años 2009 y 2010 para el SO_2 en la estación M.

Año	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2009	2010
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0
UE	0	0	0	0	0	0	0	0
OMS	17	99	59	32	48	18	79	134

Tabla 9.15. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO_2 en la estación SM1.

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UE	0	0	0	0	0	0	0	1	0
OMS	22	0	41	74	29	17	63	81	79

Tabla 9.16. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO_2 en la estación SM2.

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OMS	61	48	55	65	44	28	71	71	19

Tabla 9.17. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO_2 en la estación SM3.

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OMS	65	65	93	105	71	148	264	185	79

Tabla 9.18. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO₂ en la estación SM4.

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OMS	63	77	101	127	55	48	130	117	173

Tabla 9.19. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO₂ en la estación SM5.

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OMS	53	1	109	188	86	70	84	90	173

Tabla 9.20. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO₂ en la estación SM6.

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OMS	88	24	62	3	0	0	3	3	8

Tabla 9.21. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO₂ en la estación SM7.

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UE	0	0	0	0	0	2	0	0	0
OMS	52	33	6	176	209	272	364	108	140

Tabla 9.22. Incidencias diarias desde el año 2002 al 2010 para el SO₂ en la estación SM8.

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OMS	4	2	4	15	2	33	62	97	63

En la figura 9.16 se representan las concentraciones anuales de SO₂ en la provincia de Huasco, y se compara con la normativa chilena. Esta normativa se cumple en todas las estaciones y para todo el período analizado. Los valores más altos se producen en las estaciones SM7 y SM3 entre el año 2005 y 2009; el mayor valor es de 41,25 µg/m³ y se produce en la estación SM7 el año 2007, concentración muy por debajo de los 80 µg/m³ establecido en la normativa chilena.

Es importante destacar que no existe un plan de descontaminación de SO₂ para la provincia de Huasco, aunque en el año 2016 se estableció un plan de prevención la contaminación atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante para PM, a través del decreto 38, el cual cuenta con un plazo de implementación de 10 años y pretende reducir las emisiones de PM (BCN, 2016).

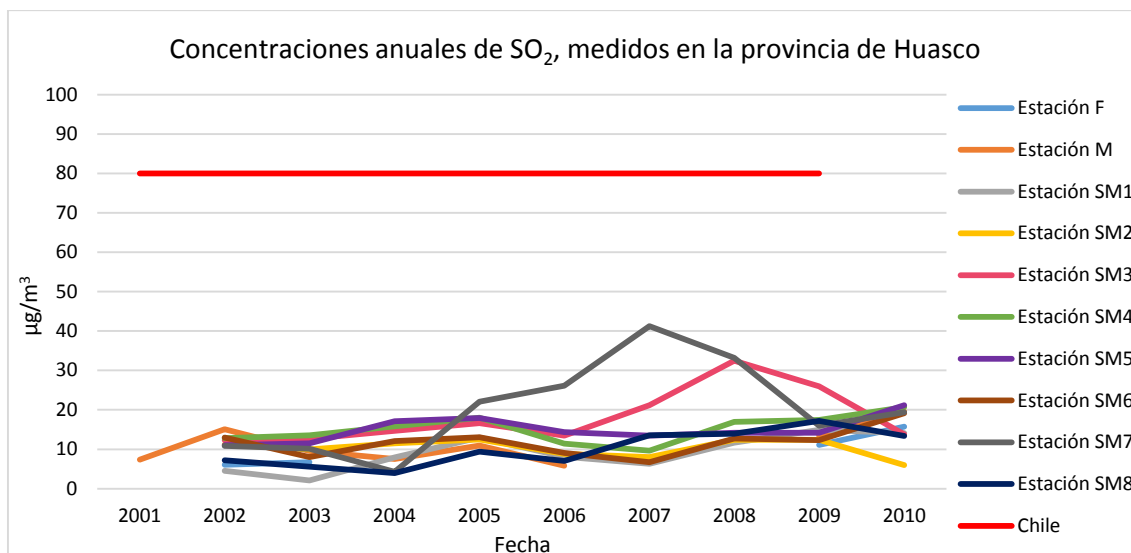


Figura 9.16. Concentraciones anuales de SO₂ en las estaciones F, M, SM1, SM2, SM3, SM4, SM5, SM6, SM7 Y SM8 y valor límite de SO₂ según la normativa chilena.

En la provincia de Huasco las principales fuentes de emisión de SO₂ son el puerto y las centrales termoeléctricas, en especial Guacolda, por su mayor capacidad y funcionar a carbón.

La estación que tiene el promedio y el rango más altos es SM7, esto producto de su ubicación, más cercana a un cerro, lo que provoca que el SO₂ permanezca en el sector y le resulte más difícil dispersar por la altura de los cerros.

El promedio y la desviación estándar en cada estación es muy similar, por lo que las concentraciones se han mantenido aproximadamente constante durante el periodo analizado, a excepción de las estaciones SM3 y SM7 que aumentan desde los años 2006 al 2008.

Se cumple tanto con las normativas: chilena y de la UE, en contraste, el valor guía de la OMS es sobrepasado para casi todas las estaciones y durante casi todo el tiempo.

El gobierno de Chile recién el año 2016 establece el plan de prevención de la contaminación atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante, pero tiene un plazo de implementación de 10 años y pretende reducir solamente las emisiones de PM, no refiriéndose al SO₂. Esto es porque si las concentraciones del 2009 se han mantenido, entonces cumplen con la normativa de calidad del aire chilena.

Conclusiones sobre las concentraciones de SO₂ en la región de Atacama

En esta región se determinó que las principales fuentes de emisión de este contaminante son las fundiciones, las termoeléctricas y el puerto de Huasco.

Al comparar las concentraciones diarias de SO₂ entre las tres provincias: Chañaral, Copiapó y Huasco, se determina que una zona de la provincia Chañaral, específicamente el sector cercano a la fundición Potrerillos, es la zona más contaminada, ya que tiene las concentraciones de SO₂ más altas, sobrepasando los límites diarios estipulados por Chile (250 µg/m³), la UE (125 µg/m³) y la OMS (20 µg/m³) y el límite anual indicado por Chile (80 µg/m³). A pesar de que los valores diarios en la estación DI tienen un máximo de 2613 µg/m³ y un promedio de 575,2 µg/m³, se

trata de una contaminación puntual, que se restringe a la zona cercana a la fundición, pues en CAP que está a 3 km de DI, el valor máximo es de $1470 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y su promedio es de $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Como en DI no hay población cercana, se rige por la normativa relativa a riesgos laborales chilena, la cual se cumple. Y a pesar de que en CAP no se cumple con las normativas de calidad del aire, no se ha realizado otro plan de descontaminación de la zona, esto puede ser porque se trata de una zona contaminada aislada y puntual.

En la provincia de Copiapó se cumple con la normativa chilena desde el año 1999 en casi todas las estaciones, excepto en la estación Pai donde se supera el valor límite diario durante casi todo el tiempo analizado. Con respecto a la normativa Europea, se cumple en casi todas las estaciones desde el año 2001, excepto para Pai que el valor límite diario es superado durante todos los años analizados. Por último, el valor indicado por la OMS es superado durante todo el periodo analizado y en todas las estaciones.

En la provincia de Huasco se cumple con las normativas de Chile y de la UE durante todo el periodo analizado. En cambio, el valor guía que entrega la OMS, se sobrepasa en todas las estaciones de la provincia de Huasco y durante casi todo el tiempo, excepto en el año 2003 en la estación SM1 y los años 2006 y 2007 en SM6.

Que se sobrepase con el valor indicado por la OMS durante casi todo el periodo analizado y en casi todas las estaciones indica que los habitantes de la región se encuentran en riesgo de contraer enfermedades respiratorias y pulmonares, principales consecuencias por estar en contacto con este contaminante. Sería conveniente revisar el valor límite diario normado en Chile, pues este valor es el doble que el estipulado por la UE y 12,5 veces mayor que el recomendado por la OMS.

En todas las provincias se han implementado planes de descontaminación, el primero se realizó en la provincia de Copiapó el año 1995 y contaba con un programa para reducir las emisiones de S, PM y As. En 1998 en la provincia de Chañaral el plan limita las emisiones de SO_2 y de PM. En el año 2017, en Huasco, se publica un plan de prevención, con el propósito de reducir las emisiones de PM, pero que tiene un plazo de implementación de 10 años y no aborda las emisiones de SO_2 . En este estudio solo se prueba la eficacia del plan implementado en la provincia de Copiapó, esto porque fue implementado el año 1995 y se cuenta con datos validos desde 1993 al 2009.

Los factores que influyen en la dispersión del SO_2 en la región de Atacama son: ubicación, viento y la geografía. Mientras más cercanas están las estaciones de las fuentes de emisión, las concentraciones son más altas. La dirección y velocidad del viento también intervienen en los niveles de SO_2 y depende del sector, en la costa el viento se mueve en las direcciones sur-suroeste, suroeste, oeste-suroeste y oeste la mayor parte del año, en cambio, en el valle el viento sopla en dirección norte, noreste y sur. La velocidad del viento en la región es baja (2 a 8 m/s). Otro factor importante es la geografía, pues los cerros impiden que los contaminantes se muevan y los mantienen en el sector, en cambio las zonas cercanas al mar favorecen la dispersión de contaminantes.

La mayoría de las estaciones mostraron un comportamiento cíclico anual; los valores más altos se registraron en otoño e invierno, esto porque los gases se dispersan menos en esta época.

Finalmente, se recomienda revisar los aparatos de medida de este contaminante en las estaciones existentes, para contar con datos actuales de los niveles de SO_2 en la región.

9.1.2 Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Para el caso de los NO_x el análisis se separó en NO y NO_2 , ya que solo se cuenta con datos validados para estos contaminantes únicamente en la provincia de Huasco.

Las concentraciones diarias no se pudieron comparar con los valores límites de las legislaciones, ya que no se cuenta con valores límites diarios en las normativas: de Chile, de la EPA, de la UE ni de la OMS.

En el análisis anual, se compararon las concentraciones del NO_2 con la normativa vigente, pero nuevamente no se pueden comparar las concentraciones de NO , porque no se cuentan con valores límites anuales para este contaminante en la legislación revisada (Chile, UE, EPA y OMS).

Monóxido de nitrógeno (NO)

Las concentraciones del NO se midieron en la estación F durante los años 2004 al 2009 y en M entre el 2004 al 2010, ambas se ubican en la ciudad de Huasco (10.149 habitantes) a poco más de 500 metros de distancia una otra. Las estaciones están a más de 3 km al este de las centrales termoeléctricas Guacolda y Huasco TG, a 3 km al noroeste de Huasco Vapor y a 2 km al este del puerto (véase la figura 9.17).



Figura 9.17. Ubicación de las centrales termoeléctricas (azul), de las estaciones M y F (amarillo), del puerto de Huasco (barco azul) y de la ciudad de Huasco (rojo con punto negro).

En la figura 9.18 se grafica la concentración de NO de ambas estaciones en función del tiempo. Se aprecia que las concentraciones son muy similares y casi constantes en el tiempo. Los mayores valores se producen en la estación M, especialmente durante el año 2007, en donde se produce el pico máximo de concentración de NO el 30 de noviembre de 2007, el cual fue de

73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el caso de F, las mayores concentraciones se producen el año 2008, específicamente a finales de junio de ese año, en donde los valores llegan casi a los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

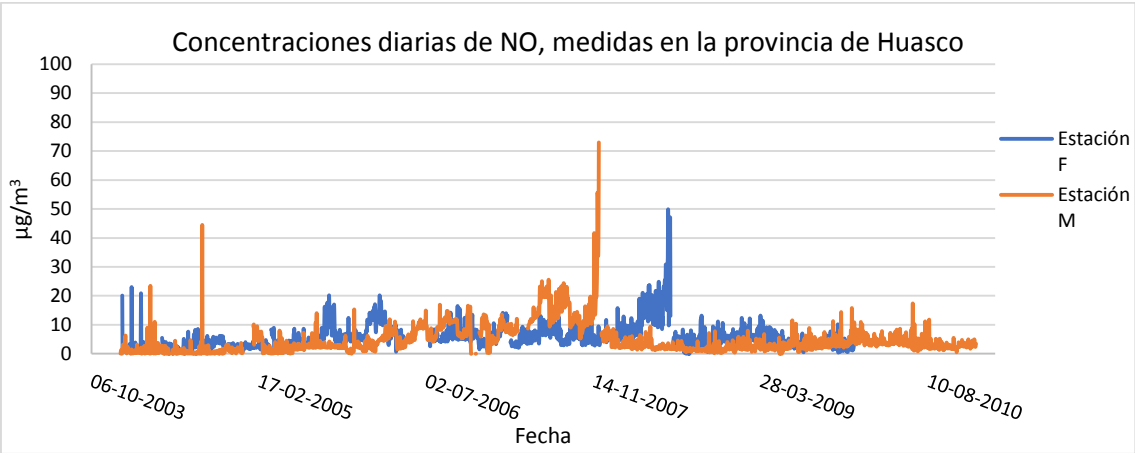


Figura 9.18. Concentraciones diarias de NO en las estaciones F y M.

Como se indica en la tabla 9.23 el rango de concentraciones para F va de 0 a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 5,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación estándar resultó en 4,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto a M, el rango de concentraciones es de 0 a 73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de 4,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación es de 5,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 9.23. Rango, promedio y desviación estándar en las estaciones F y M para NO.

Provincia	Estación	Rango [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Desviación Estándar [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Huasco	F	0 - 50	5,6	4,3
	M	0 - 73	4,6	5,1

Los promedios son muy similares en ambas estaciones, 5,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para F y 4,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para M, y comparando los promedios con las desviaciones en cada estación, estos también son similares, por lo que se comprueba numéricamente lo indicado anteriormente: que las concentraciones en ambas estaciones son muy parecidas.

En la figura 9.19 se aprecia que las concentraciones anuales de NO en la estación F y M están entre 1,15 y 12,77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. No es posible compararlo con las normativas, pues como se indicó anteriormente no hay valor límite anual para este contaminante en las normativas estudiadas. De todas maneras se corrobora que las concentraciones en las estaciones están bajo los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ anualmente y que no hay grandes variaciones en los años analizados (2002 al 2008).

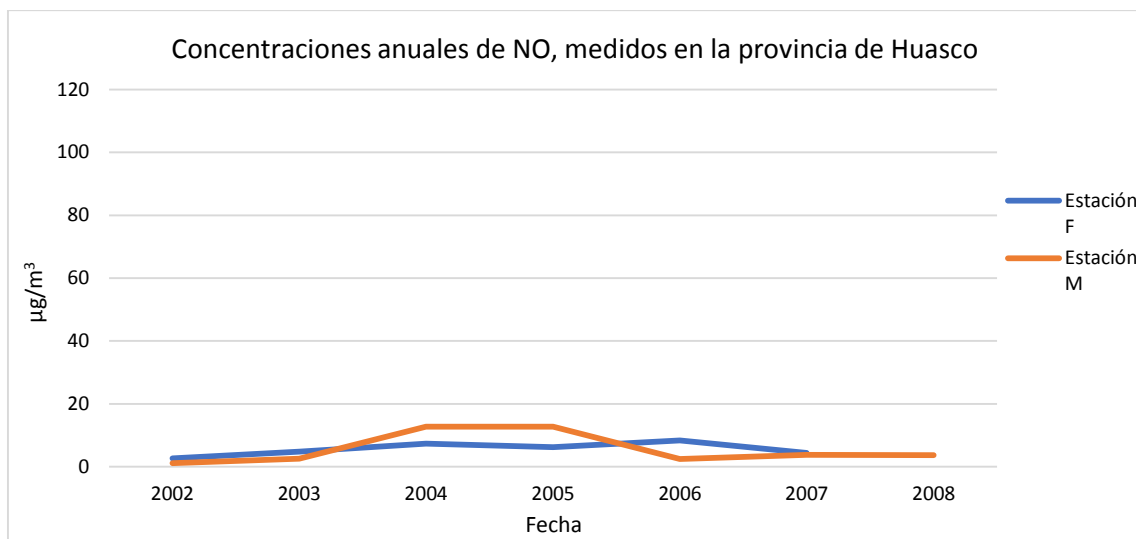


Figura 9.19. Concentraciones anuales de NO en las estaciones F y M.

Dióxido de nitrógeno (NO₂)

Como se muestra en la gráfica de la figura 9.20 se midieron las concentraciones de NO₂ en la estación F durante los años 2003, 2004 y desde el 2005 al 2010, y en M se midieron entre los años 2002 al 2010.

Para ambas estaciones, la concentración es similar y se mantiene constante en el tiempo, salvo picos puntuales. Las diferencias entre las estaciones son el resultado de los picos producidos desde finales de julio hasta noviembre del año 2003, el 30 de noviembre de 2009 y en marzo de 2009.

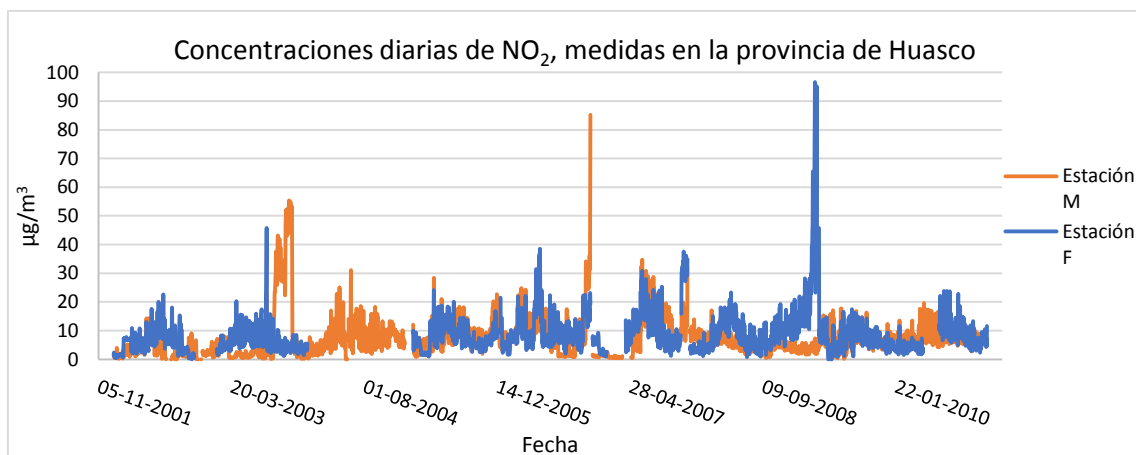


Figura 9.20. Concentraciones diarias de NO₂ en las estaciones M y F.

El NO₂ en ambas estaciones muestran un comportamiento cíclico anual; los valores más altos se registraron en otoño e invierno, esto porque los gases se dispersan menos, pues las condiciones meteorológicas como las bajas temperaturas, la baja velocidad del viento y la capa de inversión térmica cercana a la superficie producen que los gases permanezcan estables en la baja atmósfera.

Como se indica en la tabla 9.24 el rango de concentraciones en la estación F es de 0 a 97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el promedio es de 8,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto a M, el rango de concentraciones va de 0 a 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el promedio es de 4,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para ambas estaciones la desviación estándar es de 7,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tanto los rangos como los promedios son muy similares, por lo que las concentraciones de NO durante el periodo analizado son muy parecidas, esto producto de la cercanía entre las estaciones F y M.

En cuanto a la comparación de los promedios y las desviaciones en cada estación, estos también son parecidos, lo que indica que en ambas estaciones la concentración no varía en el tiempo.

Tabla 9.24. Rango, promedio y desviación estándar en las estaciones F y M para NO₂.

Provincia	Estación	Rango [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Desviación Estándar [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Huasco	F	0 – 97	8,7	7,1
	M	0 – 85	7,5	7,1

En la figura 9.21 se aprecia que las concentraciones anuales de NO₂ en la estación F y M no sobrepasan el límite de la normativa chilena y de la EPA durante todo el tiempo analizado, el cual se fijó en 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En relación a la UE y OMS, ambos tienen como límite anual 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, este valor tampoco es sobrepasado durante los años 2002 al 2010, pues el valor más alto es de 11,85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación F en el año 2009. En general, las concentraciones de NO₂ no varían en las estaciones analizadas, siendo muy similares durante todo el tiempo analizado.

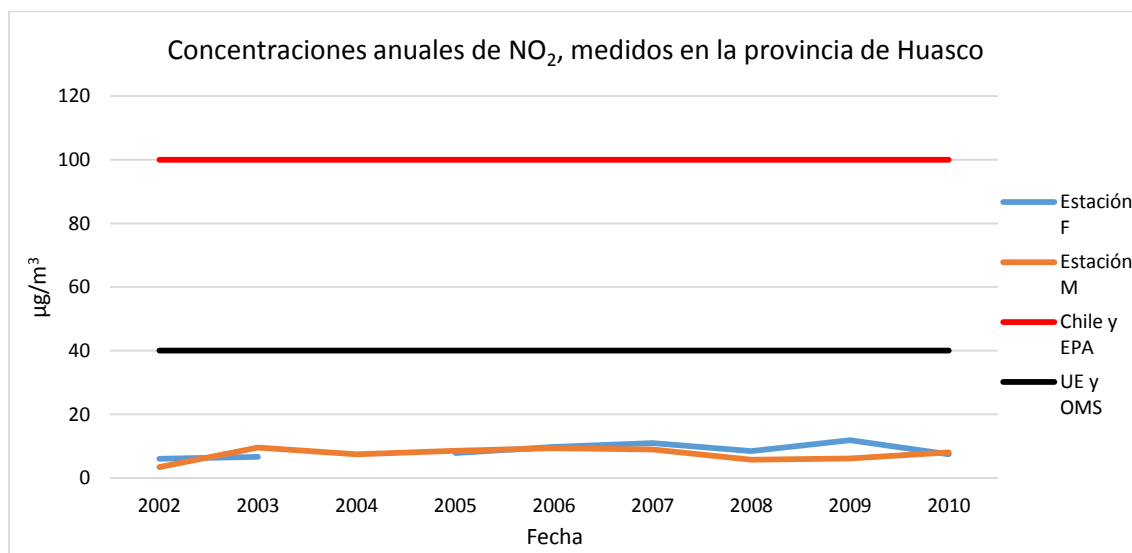


Figura 9.21. Concentraciones anuales de NO₂ en las estaciones F y M, y valor límite según la normativa chilena, de la EPA, de la UE y de la OMS.

Conclusiones sobre las concentraciones de NO y de NO₂ en la región de Atacama

Las principales fuentes de emisiones antropogénicas de los óxidos de nitrógeno (NO y NO₂) son los procesos de combustión: calefacción, generación de electricidad, motores de vehículos y barcos. En este caso, las estaciones F y M se ubican cerca de las centrales termoeléctricas y del puerto, por lo que estas son las principales fuentes.

La central termoeléctrica Guacolda tiene una capacidad de 760 MW, Huasco TG de 64 MW y Huasco Vapor de 16 MW, por su alta capacidad la que más contribuiría con las emisiones de NO_x es Guacolda. El puerto de Huasco, como se indicó en el apartado 3.8, movilizó 10.989.605 toneladas métricas durante el año 2016, lo que también lo hace una fuente de emisión de NO_x.

Se descarta la influencia de la mina a cielo abierto Los Colorados, porque se encuentra a más de 50 km de las estaciones y en dirección noreste (desfavorecida en la dispersión de contaminantes), además como se indicó anteriormente esta mina es principalmente fuente de emisión de PM.

La ciudad de Huasco, en donde se localizan las estaciones, se descarta como fuente de contaminación por vehículos motorizados, ya que su población es limitada, pues cuenta con 10.149 habitantes.

La estación F y M se ubican al este de las centrales y del puerto en donde el viento sopla a menor velocidad (2 – 6 m/s) y con menor frecuencia, pues en los puertos el viento está direccionado mayoritariamente hacia el sur-suroeste, suroeste, oeste-suroeste y oeste. Esto indica que las concentraciones en M y F deberían ser bajas, por lo que sería necesario instalar un instrumento que mida NO y NO₂ en la estación ME que es la más cercana a Guacolda (300 m) y está favorecida por la dispersión de contaminantes desde dicha fuente.

El NO₂ en ambas estaciones muestran un comportamiento cíclico anual; los valores más altos se registraron en otoño e invierno, esto porque los gases se dispersan menos, pues las condiciones meteorológicas como las bajas temperaturas, la baja velocidad del viento y la capa de inversión térmica cercana a la superficie producen que los gases permanezcan estables en la baja atmósfera.

Al comparar el promedio y la desviación en cada estación, los valores resultan similares, por lo que no existe una variación en los niveles de NO y de NO₂ en el tiempo, salvo el ciclo anual recién mencionado.

Se recomienda instalar aparatos de medida de este contaminante en las estaciones existentes de la provincia de Huasco. También sería necesario instalar estaciones que midan este contaminante en las provincias de Chañaral y de Copiapó, especialmente cercanas a las fundiciones, los puertos, las ciudades y las centrales termoeléctricas.

9.1.3 Materia Particulado (PM)

Para el caso del material particulado, PM₁₀ y PM_{2.5}, el análisis también se separó por provincia, pero en este caso se cuentan con datos válidos únicamente en la provincia de Copiapó y de Huasco, ya que lamentablemente no hay datos validados en la provincia de Chañaral, pues a

pesar que se mide PM_{10} en la estación DI y CAP, la cantidad de datos es menor al 75%, por lo que no son considerados en este estudio.

Provincia de Chañaral

A pesar que no se cuentan con datos validados para esta provincia, es importante destacar que se deberían instalar aparatos que midan PM_{10} y $PM_{2.5}$, ya que en las estaciones existentes: CAP y DI, solo miden correctamente SO_2 , pues las mediciones de PM_{10} tienen menos del 33% de los datos, lo cual resulta insuficiente para ser analizados. Además, sería recomendable instalar estaciones que midan PM en el puerto de Chañaral que moviliza 656.367 toneladas métricas (0,5% del total nacional), en la mina a cielo Abierto El Salvador que tuvo una producción de cobre de 59,8 toneladas métricas el año 2016, en las ciudades de Chañaral (12.219 habitantes), en El Salvador (8.697 habitantes) y en Diego de Almagro (7.951 habitantes), y cerca de las centrales termoeléctricas: Diego de Almagro (24 MW) y San Lorenzo (56 MW), que funcionan con gasóleo.

En la figura 9.22 se muestra una imagen satelital que indica la gran extensión que alcanzó el aluvión de marzo de 2015 en la ciudad de Chañaral. La inundación superó los 3 metros, alcanzando un máximo de 3,7 metros (Grijalba, 2016). Esta catástrofe debió incrementar los niveles de PM en la zona, pero no puede ser verificado, ya que no se cuenta con datos que validen esta afirmación.



Figura 9.22. Imagen satelital de Chañaral, tomada el 28 de marzo de 2015. Fuente: Grijalba, 2016.

Provincia de Copiapó

En la figura 9.23 se muestran las estaciones que se ubican en la provincia de Copiapó, las cuales corresponden a Copiapó Sívica (CS) y a Los Volcanes (LV), ambas se emplazan específicamente en la ciudad de Copiapó.



Figura 9.23. Ubicación de las centrales termoeléctricas (azul), de las estaciones CS y LV (amarillo), de la fundición Hernán Videla Lira (rojo), de la mina a cielo abierto La Candelaria (verde), de la ciudades de Copiapó y Tierra Amarilla (rojo con punto negro).

En la estación CS se midieron las concentraciones diarias de PM_{10} en el año 2013 y desde el 2015 al 2018 y las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ se midieron desde el 2013 al 2018, como se muestran en las gráficas de la figuras 9.24 y 9.25, respectivamente. La estación LV mide PM_{10} , solo durante el año 2003 (véase la línea anaranjada de la figura 9.24).

En ambas estaciones y para ambos tipo de material particulado se compararon las tendencias temporales con las normativas vigentes.

Las estaciones no son comparables, ya que a pesar de estar cercanas una de la otra, los periodos analizados son muy diferentes.

Los valores son altos en las 2 estaciones para PM_{10} , sobrepasando las normativas. En la estación LV las concentraciones generalmente están bajo los $50 \mu g/m^3$, produciéndose picos puntuales el 11 de mayo y 6 de julio de 2003, con concentraciones de $194,8$ y $84,3 \mu g/m^3$, respectivamente.

Durante el año 2015 existen muchos valores por sobre los $100 \mu g/m^3$ en la estación CS. El 2, 10, 12 y 13 de junio se produjeron 4 picos sobre los $150 \mu g/m^3$, específicamente de $173,8 \mu g/m^3$, $169,4 \mu g/m^3$, $217,0 \mu g/m^3$ y $346,7 \mu g/m^3$, respectivamente. La situación mejora el año 2016 y 2017, donde se visualiza que las concentraciones disminuyen.

Los niveles de $PM_{2.5}$ también son altos y sobrepasan las normativas hasta el año 2017. Se visualiza un aumento de la concentración el año 2015, el cual ha ido disminuyendo hasta el 2018. Las concentraciones por sobre los $50 \mu g/m^3$ se produjeron el 16 de mayo y el 18 de junio de 2015, alcanzando valores de $53,6 \mu g/m^3$ y $59,6 \mu g/m^3$, respectivamente.

En ambas estaciones se produce un comportamiento cíclico anual de las emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, las mayores concentraciones se producen desde abril a agosto, correspondientes a la temporada otoñal e invernal. En cambio los valores más bajos se dan en noviembre a marzo

correspondiente al periodo primaveral y estival. La explicación a este comportamiento es que en la época de invierno y dado que la zona analizada está en el valle de Copiapó, los gases se dispersan menos, entonces la concentración de contaminantes es mayor, pues las condiciones meteorológicas como las bajas temperaturas, la baja velocidad del viento y la capa de inversión térmica cercana a la superficie producen que los gases permanezcan estables en la baja atmósfera. Esta situación mejora en primavera y verano, ya que las condiciones atmosféricas (las altas temperaturas, las mayores velocidades del viento y la capa de inversión térmica con más altura) dispersando mejor los contaminantes.

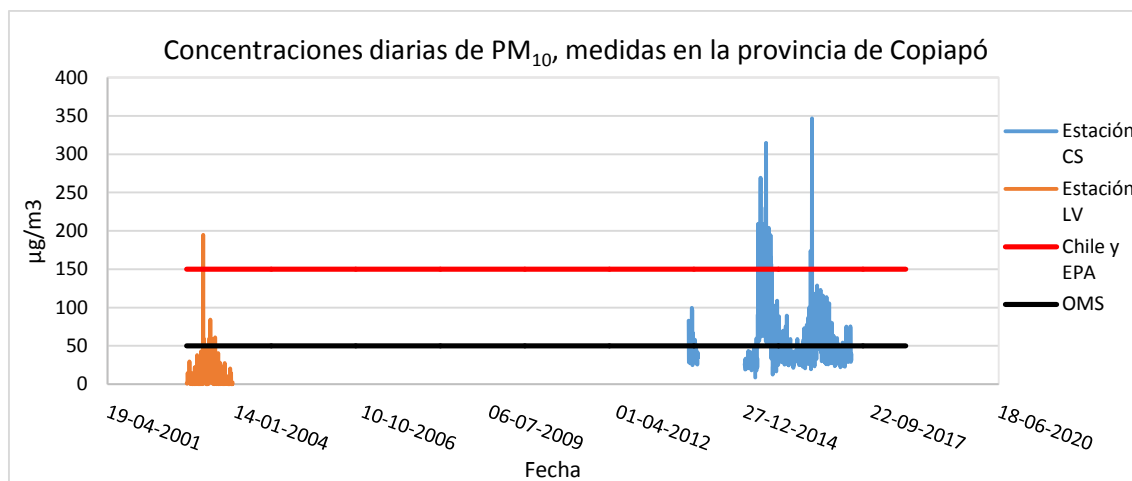


Figura 9.24. Concentraciones diarias de PM_{10} en las estaciones CS y LV.

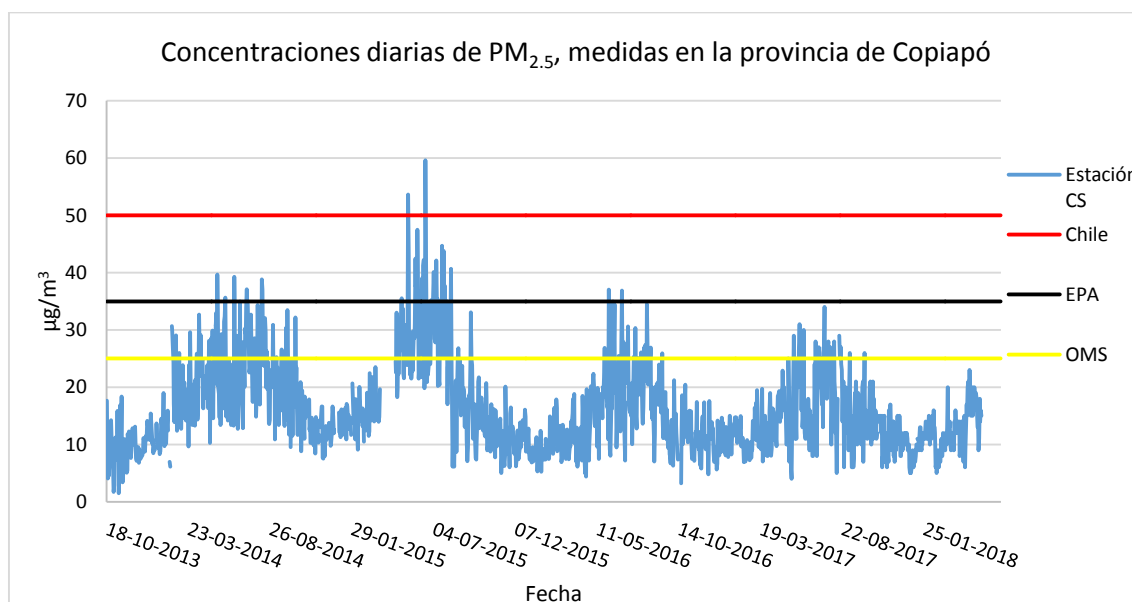


Figura 9.25. Concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ en la estación CS.

La estación CS se emplaza en la ciudad de Copiapó, a casi 9 km al noroeste de la fundición, alrededor de 15 km al noreste de las centrales termoeléctricas Tierra Amarilla, Termopacífico y Cenizas, con capacidades de 144 MW, 87 MW y 16 MW, respectivamente. CS está a más de 15

km al norte de la mina a cielo abierto La Candelaria, a 12 km al noroeste de la ciudad de Tierra Amarilla y a más de 60 km al sureste del puerto de Caldera.

LV también se encuentra en la ciudad de Copiapó, está a menos de 200 m de la avenida Los Loros, a menos de 2 km al sureste de CS, a casi 7 km al noroeste de la fundición, a más de 15 km al norte de la minera La Candelaria, a más de 60 km al sureste del puerto de Caldera y a más de 15 km al noreste de las centrales termoeléctricas Cenizas, Tierra Amarilla y Termopacífico.

Las principales fuentes antropogénica de PM son el tráfico de vehículos motorizados, las actividades industriales, la minería, la construcción y las cementeras. En este caso, cercana a las estaciones de monitoreo se encuentran la fundición Hernán Videla Lira, la mina a cielo abierto La Candelaria, las ciudades de Copiapó y Tierra Amarilla y las centrales termoeléctricas: Cenizas, Tierra Amarilla y Termopacífico.

Se descarta cualquier influencia de los centros urbanos, pues la cantidad de habitantes de la ciudad de Copiapó es de 153.937 y la de Tierra Amarilla es de 14.019. El número de vehículos motorizados en toda la región es de 91.523, lo que corresponde al 2% del total nacional. Además, 4.754 son no catalíticos y la mayoría, o sea 86.769 vehículos son catalíticos o gas.

Las centrales termoeléctricas cercanas son: Tierra Amarilla que cuenta con una potencia de 144 MW, Termopacífico con 87 MW de potencia y Cenizas con 16 MW; todas operan con gas natural. Las tres centrales están muy cercas entre sí y se localizan al suroeste de las estaciones; por esta razón el viento se ve desfavorecido en la dispersión de contaminantes desde las centrales hacia las estaciones. El que la dirección del viento no favorezca la dispersión de contaminantes desde las centrales a las estaciones y que las capacidades de operación sean baja, hace que no se consideren como fuentes de contaminación de PM que afecte a las estaciones CS y LV.

La fundición, con capacidad de 320 kt/año y que actualmente funciona a gasóleo, contribuye con la presencia de material particulado en la zona, pero no afecta mayormente a las estaciones CS y VL, ya que ambas se ubican al noroeste de la fundición, donde el viento casi no sopla en esa dirección. A pesar de esto, es importante notar que el plan de descontaminación implementado en la fundición el año 1995 debió disminuir no solo la concentración de SO₂, sino también la de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), esto no puede ser comprobado en este estudio, pues tendrían que estar en funcionamiento las estaciones cercanas a la fundición y donde la dispersión de contaminantes se vea favorecida desde el año 1995 en adelante.

En cuanto a la mina a cielo abierto La Candelaria, producto de las tronaduras y del polvo que se levanta a causa de la circulación de los vehículos pesados, también resulta ser una fuente de contaminación de material particulado. El año 2016 la producción de cobre fue de 135,4 miles de toneladas métricas, siendo la mina que más producción de cobre tuvo en la región de Atacama. El área que ocupa esta mina es de aproximadamente 10 km² y las estaciones se ubican al norte de esta, hacia donde el viento sopla la mayor parte del año (40%) con velocidades de 2 a 8 m/s. Por lo que a pesar de que la mina se encuentra a 15 km, el viento dispersa mayormente el material particulado hacia esa zona, por lo que se considera a La Candelaria como una fuente de emisión de material particulado, que afecta especialmente a las ciudades de Copiapó y Tierra Amarilla, que se ubican al norte de dicha mina.

Como se muestra en la tabla 9.25 el rango para la estación CS en PM₁₀ va de 0 a 347 µg/m³, el promedio es de 50,6 µg/m³ y la desviación estándar de 32,8 µg/m³. En LV el rango está entre 0

a $195 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de $8,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación es de $15,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para $\text{PM}_{2,5}$ medido en CS, el rango es de 0 a $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio resultó ser de $15,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación $7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 9.25. Rango, promedio y desviación estándar en las estaciones CS y LV para PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$.

Provincia	PM	Estación	Rango [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Desviación Estándar [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Copiapó	PM_{10}	CS	0 – 347	50,6	32,8
		LV	0 – 195	8,5	15,9
	$\text{PM}_{2,5}$	CS	0 – 60	15,9	7,5

Para el caso de PM_{10} medido en CS, el rango es muy grande, no así el promedio de los datos. Con respecto al mismo contaminante, pero medido en LV, este resulta con un promedio más bajo, pero con un amplio rango.

Al comparar el promedio y la desviación en cada estación, se verifica que es muy distinto. En CS el promedio de PM_{10} es 1,6 veces mayor que la desviación y en LV la desviación es 1,9 veces mayor que el promedio. Esto indica que las concentraciones de PM_{10} han ido cambiando a través del tiempo. Además de no poder comparar las estaciones, por la diferencia en periodos que fueron medidas las concentraciones, tampoco se pueden analizar la tendencia del PM_{10} , pues la cantidad de años de medición es limitada.

Para el caso de $\text{PM}_{2,5}$ medido en CS el rango es de 0 a $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el promedio es de $15,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación de $7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto indica las concentraciones de este contaminante han cambiado con el tiempo, ya que el promedio es diferente a la desviación, pues el promedio es 2,1 veces mayor que la desviación.

El 25 de marzo de 2015 en la región de Atacama se produjeron precipitaciones intensas (entre 50 mm - 90 mm) que ocasionaron aluviones, lo que se transformó en una inesperada catástrofe. Se debe tomar en cuenta que las precipitaciones normales anualmente en la región corresponde a 40 mm aproximadamente, como se indica en el apartado 3.4, por lo que la cantidad de agua caída en tan poco tiempo provocaron el desborde de los ríos de la región de Atacama. Se determinó que cayeron 11 mm en 30 minutos, es decir, el equivalente a un año de precipitaciones en la ciudad de Copiapó, por lo que la tierra no fue capaz de absorber esa cantidad de agua en tan poco tiempo, lo que produjo 18 aluviones y dejó un saldo de 31 muertos, 35.086 damnificados, 2.071 viviendas destruidas y 6.253 viviendas con daño mayor, quedando este desastre avaluado en 1.500 millones de dólares (Griem, 2018; SONAMI, 2016 y Pontificia Universidad Católica de Chile, 2015).

El aluvión tal y como se muestra en las imágenes de las figuras 9.26 y 9.27 trajo consigo agua y barro a los asentamientos urbanos, destruyendo todo a su paso, pero además, pasado el tiempo y a pesar que se removió gran parte de ese barro, la tierra que quedó se secó y produjo polvo en la zona.



Figura 9.26. Imagen de la ciudad de Copiapó después del aluvión del 25 de marzo de 2015.
Fuente: Griem, 2018.



Figura 9.27. Imagen de la ciudad de Copiapó después del aluvión del 25 de marzo de 2015.
Fuente: SONAMI, 2016.

Al comparar la fecha de este evento (25 de marzo de 2015) con el gráfico de la figura 9.24 se verifica que desde abril de 2015 las concentraciones de PM_{10} aumentan, de valores bajo los $60 \mu g/m^3$ hasta llegar a una máxima de $314,7 \mu g/m^3$ el 18 de junio de 2015. A pesar que la mayor cantidad de valores altos se producen en el año 2015, no se aprecia una baja en términos generales para el año 2016, 2017 y 2018, solo que a medida que avanza hay menos picos. En relación al $PM_{2.5}$, también se verifica que las máximas concentraciones se producen el año 2015, específicamente en junio de ese año y que las concentraciones de este contaminante han bajado un poco en el 2016, luego en el 2017 y al parecer sigue bajando el 2018.

Tanto para PM₁₀ como para PM_{2.5}, la tendencia en las concentraciones desde el año 2015 es a la baja, lo cual resulta coherente, pues el Gobierno de Chile ha tomado medidas para disminuir el material particulado producto de los aluviones, pues se limpiaron calles y en principio, cuando se removía el barro se entregaron mascarillas a la población, pues a pesar de que la zona es seca y tierrosa, el aumento del polvo en las calles era visualmente notorio.

Las concentraciones diarias de PM₁₀ y PM_{2.5}, se compararon con la normativa vigente. PM₁₀ se puede comparar con los valores límites de Chile, de la EPA y de la OMS. Para el caso de la normativa Chilena y de la EPA, el valor límite diario es el mismo y corresponde a 150 µg/m³, en cambio la OMS, organismo más estricto, establece el valor en 50 µg/m³. Como se muestra en la tabla 9.26, en la estación CS se sobrepasa el valor límite establecido en Chile y la EPA durante los años 2015 y 2016. No se cumple con la ley chilena el año 2015, ya que se sobrepasa el límite en 26 días, y Chile acepta que máximo se supere el valor límite en 7 días al año. En cuanto a la normativa de la EPA, se cumple, ya que a pesar de que se sobrepasa el valor límite durante el año 2015 y 2016, la EPA indica que el valor no debe exceder más de una vez al año, pero en 3 años consecutivos y el año 2017 no es superado y el 2014 no es considerado, porque ese año no se cuenta con el 75% de los datos. En cuanto al valor guía de la OMS, este es superado durante todo el periodo analizado.

Tabla 9.26. Incidencias diarias desde el año 2013 al 2018 para el PM₁₀ en la estación CS.

Año	2013	2015	2016	2017	2018
Chile y EPA	0	26	4	0	0
OMS	24	161	146	78	29

En relación al PM₁₀ en la estación LV (véase la tabla 9.27), el límite establecido en Chile es sobrepasado en 1 oportunidad el día 11 de mayo de 2003, en donde la concentración alcanza los 194,8 µg/m³. A pesar de este alto valor, se cumple con la ley, ya que no se supera en 7 oportunidades en ese año. En cuanto a la EPA, no se puede determinar si se cumple, ya que solo se cuenta con 1 año para analizar. El valor guía de la OMS es superado en 7 días el año 2003.

Tabla 9.27. Incidencias diarias el año 2003 para el PM₁₀ en la estación LV.

Año	2003
Chile y EPA	1
OMS	7

Al comparar las concentraciones diarias de PM_{2.5} en la estación CS con el valor límite según las normativas de Chile (50 µg/m³), de la EPA (35 µg/m³) y de la OMS (25 µg/m³), se cumple con la ley chilena, a pesar que durante el año 2015 se sobrepasa el límite en 2 días (véase la tabla 9.28), ya que como se mencionó anteriormente, esta normativa acepta que máximo se supere el valor límite en 7 días al año. No se cumple con el valor que dicta la EPA, pues este organismo indica que el valor no debe exceder más de una vez al año, pero en 3 años y en la tabla 9.28 se ve que

se excede en 6 oportunidades durante el año 2014, 27 veces durante el 2015 y 2 en el 2016. En cuanto al valor guía de la OMS, este es superado desde el 2014 al 2017.

Tabla 9.28. Incidencias diarias desde el año 2013 al 2018 para el $PM_{2.5}$ en la estación CS.

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Chile	0	0	2	0	0	0
EPA	0	6	27	2	0	0
OMS	0	69	77	26	23	0

En la figura 9.28 se grafican las concentraciones anuales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la provincia de Copiapó. Para PM_{10} , en CS se cumple con la normativa chilena, ya que a pesar que en el año 2015 ($63,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2016 ($53,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se sobrepasa el valor límite de los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la ley chilena se incumple si el valor límite se sobrepasa en 3 años consecutivos y como no se cuentan con los datos validados para el año 2014, ese año no se considera en el análisis. En cuanto a la UE, esta solo se cumple el año 2018, ya que en los años anteriores se supera el valor límite de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El valor establecido por la OMS es de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, este se sobrepasa durante todo el periodo analizado.

Para PM_{10} en la estación LV la concentración el año 2003 fue de $8,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor muy por debajo de los límites fijados por las normativas: chilena ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), de la UE ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y de la OMS ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

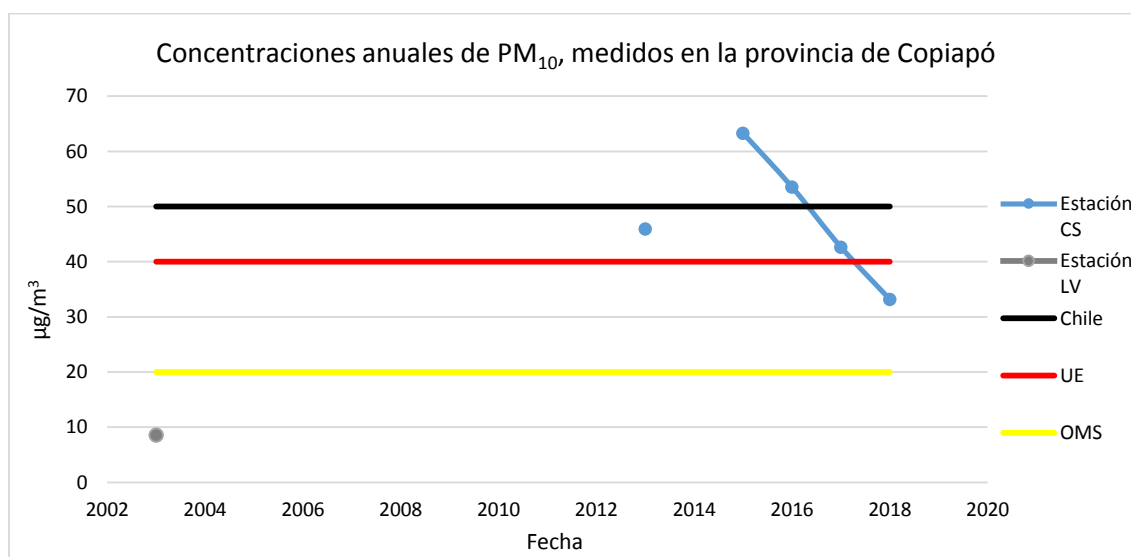


Figura 9.28. Concentraciones anuales de PM_{10} en la estaciones CS y LV de la provincia de Copiapó, y valores límites según las normativas.

En relación a $PM_{2.5}$, las concentraciones se representan gráficamente en la figura 9.29 y se comparan con la normativas: chilena ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), de la EPA ($12 \mu\text{g}/\text{m}^3$), de la UE ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y de la OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En la gráfica se aprecia que se cumplen durante todo el periodo analizado

con las normativas de Chile y de la UE; no así con el valor límite estipulado por la EPA y la OMS, ya que en ambos casos no son superados únicamente el año 2013.

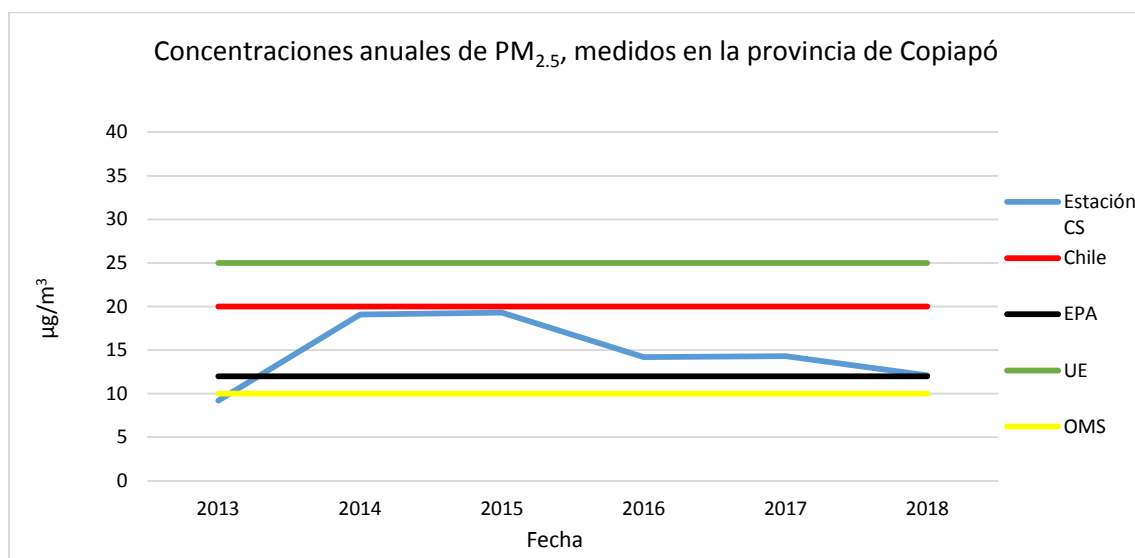


Figura 9.29. Concentraciones anuales de PM_{2.5} en la estación CS de la provincia de Copiapó, y valores límites según las normativas.

La principal fuente de emisión de PM en las estaciones analizadas es la mina a cielo abierto La Candelaria, pero sería importante instalar aparatos de medidas de PM en las estaciones existentes en la provincia, especialmente en las que se encuentran cercanas a la fundición Hernán Videla Lira y a la mina La Candelaria. Además de instalar una nueva estación en la ciudad de Caldera, la cual es una ciudad puerto y cercanas a las termoeléctricas Cenizas, Tierra Amarilla y Termopacífico.

A pesar que en el año 1995 se aplica un plan de descontaminación en la fundición, en este estudio no es posible determinar los efectos en las concentraciones de PM, porque se cuentan con datos validados recientes y únicamente de la ciudad de Copiapó, además las estaciones están alejadas de la fundición.

Al comparar el promedio y la desviación estándar por estación, se verifica que estos son diferentes, lo que indica que las concentraciones de PM varían a través del tiempo. Además, tanto PM₁₀ como PM_{2.5} tienen un comportamiento cíclico anual.

A pesar que las concentraciones han disminuido, se aprecia un aumento de las concentraciones de PM producto de los aluviones el año 2015.

En relación al cumplimiento de la normativa chilena, para PM₁₀ se cumple desde el año 2016, pero el valor entregado por la OMS siempre es superado. PM_{2.5} cumple durante todo el periodo analizado con la normativa chilena, no así con el valor indicado con la OMS.

Se hace necesario revisar los valores límites chilenos, ya que casi siempre superan el valor indicado por la UE y siempre sobrepasa los valores recomendados por la EPA y la OMS; siendo importante mantener las concentraciones de PM, pues la exposición a este contaminante puede provocar enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer de pulmón.

Provincia de Huasco

En esta provincia se mide $PM_{2.5}$ en la estación HS, la cual se localiza en la ciudad de Huasco (véase figura 9.30), a más de 2 km al este del puerto de Huasco, a casi 4 km al sureste de la central termoeléctrica Guacolda que funciona a carbón (760 MW), a más de 3 km al este de la termoeléctrica Huasco TG que opera con gasóleo (64 MW) y a 3 km al noreste de la central Huasco Vapor que utiliza carbón (16 MW) y casi 45 km al suroeste de la mina a cielo abierto Los Colorados que ocupa un área de 20 km².

Se descarta cualquier influencia de los centros urbanos, pues la ciudad más cercana es Huasco y la cantidad de habitantes es de 10.149. El número de vehículos motorizados en toda la región es escasa y corresponde a 91.523 vehículos (2% del total nacional).

De acuerdo a la ubicación y considerando la dirección del viento en una zona costera, el puerto de Huasco y la termoeléctrica Huasco TG resultan fuentes de emisión de contaminantes que son desfavorecidas en la dispersión de contaminantes, porque se ubican hacia el este de la estación. HS se ubica al noreste de la central Huasco Vapor y al sureste de Guacolda, ambas también resultan desfavorecidas en la dispersión de contaminante hacia la estación, pues en la zona costera las direcciones del viento son hacia el sur-suroeste, el suroeste, el oeste-suroeste y el oeste, la mayor parte del tiempo.



Figura 9.30. Ubicación de las centrales termoeléctricas (azul), del puerto de Huasco (barco azul), de la ciudad de Huasco (rojo con punto negro) y de la estación HS (amarillo).

En la figura 9.31 se muestra la gráfica de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ desde el año 2014 al 2018 y se compara con los valores límites según las normativas: chilena, de la EPA y de la OMS.

Las concentraciones aumentan el 2015, bajan levemente el 2016 y se mantienen el 2017 y 2018. Además, en la gráfica se aprecia el comportamiento cíclico anual de este contaminante; las mayores concentraciones se producen desde mayo a septiembre, correspondientes a la temporada otoñal e invernal y los valores más bajos se dan en noviembre a marzo correspondiente al periodo primaveral y estival. La explicación, como se ha indicado, es que en

la época de invierno los gases se dispersan menos, entonces la concentración de $PM_{2.5}$ en la estación es mayor, porque se mantienen cerca de esta.

Los valores más altos se producen en agosto del año 2014 y en abril, mayo y septiembre de 2015. A partir de abril del año 2015 las concentraciones son más altas, esto coincide con los aluviones que se produjeron en la zona el 25 de marzo de 2015. Y como se explicó anteriormente (apartado 9.1.3: provincia de Copiapó), después de los aluviones, el barro que no fue retirado se secó produciendo visiblemente más polvo en zona.

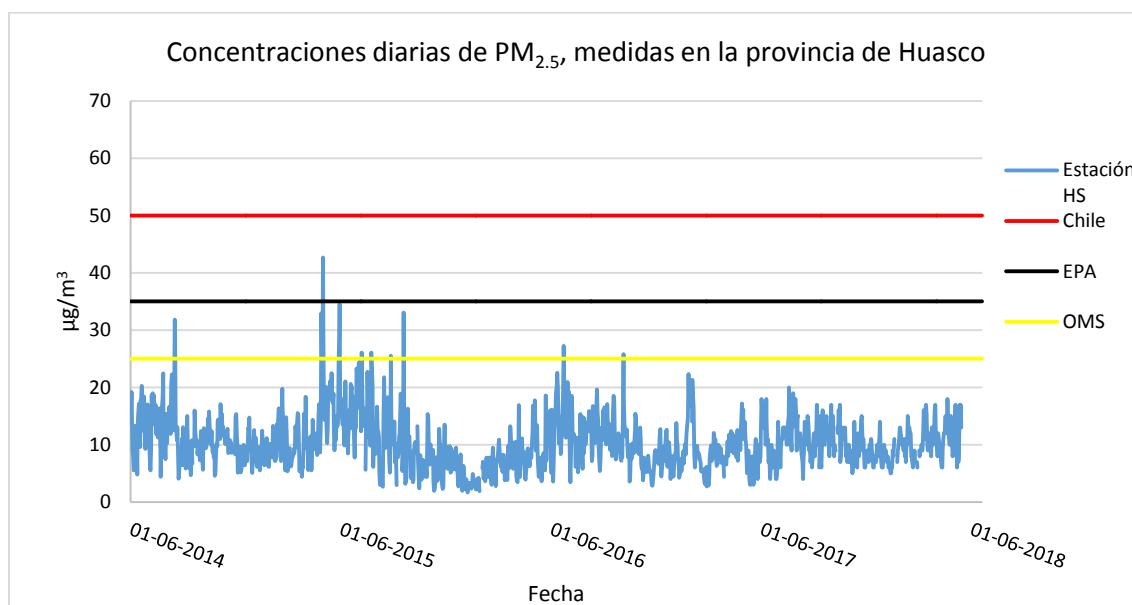


Figura 9.31. Concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ en la estación HS.

A pesar que la ubicación de la estación HS está desfavorecida para que lleguen las emisiones desde las fuentes de contaminación, en la gráfica de la figura 9.31 se aprecia que el valor límite de la OMS y de la EPA es sobrepasado, no así el estipulado por Chile. Por esta razón, es importante medir la concentración de material particulado en zonas más cercanas a las fuentes y que estén favorecidas por la dispersión del viento. En la estación ME, que es la más cercana a Guacolda y está favorecida por la dirección del viento, sería adecuado instalar un aparato que mida $PM_{2.5}$, producto de que esta termoeléctrica cuenta con una alta capacidad y funcionar a carbón. También se hace necesario monitorear las concentraciones de $PM_{2.5}$ en las zonas cercanas a la ciudad de Freirina (7.041 habitantes) que está distante a 15 km aproximadamente de la ciudad de Huasco y en Vallenar (51.917 habitantes) que está a más de 45 km de Huasco. Además, es recomendable instalar una estación de monitoreo de la calidad del aire en la zona cercana a la mina a Cielo abierto Los Colorados, ya que la ciudad de Vallenar está a más de 30 km al sureste de la mina, y Freirina y Huasco a más de 35 km al suroeste de dicha mina. Por lo tanto, los 3 centros urbanos están favorecidos en la dispersión de contaminantes desde la mina hasta ellos.

El año 2016 se establece un plan de Prevención de Contaminación Atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante, el cual solo se refiere a PM y tiene un plazo de implementación

de 10 años, por lo que no es posible determinar si este plan ha funcionado, ya que es muy reciente.

En la tabla 9.29 se indica el rango en PM_{2.5} para la estación HS, el cual va de 0 a 43 µg/m³, el promedio es de 10,2 µg/m³ y la desviación es de 4,6 µg/m³. El rango no es amplio, el promedio es bajo y el promedio resulta 2,2 veces mayor que la desviación estándar, lo que indica que las concentraciones de PM_{2.5} van cambiando a lo largo del tiempo, esto es efectivo, ya como se indicó anteriormente las concentraciones de PM_{2.5} aumentan el año 2015, bajan levemente el 2016 y se mantienen el 2017 y 2018.

Tabla 9.29. Rango, promedio y desviación estándar en la estación HS para PM_{2.5}.

Provincia	Estación	Rango [µg/m ³]	Promedio [µg/m ³]	Desviación Estándar [µg/m ³]
Huasco	HS	0 – 43	10,2	4,6

Las concentraciones diarias de PM_{2.5} se compararon con las normativas vigentes: chilena (50 µg/m³), de la EPA (35 µg/m³) y de la OMS (25 µg/m³), y como se aprecia en la tabla 9.30, durante todo el periodo analizado se cumple con la ley chilena y con la EPA, pues este último organismo indica que el valor no debe exceder más de una vez al año, pero en 3 años consecutivos y en el grafico se aprecia que solo se excede en 1 oportunidad (42,7 µg/m³) durante el año 2015. En cuanto al valor guía de la OMS este es superado puntualmente en el año 2014, 2015 y 2016.

Tabla 9.30. Rango, promedio y desviación estándar en la estación HS para PM_{2.5}.

Año	2014	2015	2016	2017	2018
Chile	0	0	0	0	0
EPA	0	1	0	0	0
OMS	2	9	2	0	0

La figura 9.32 se muestra la gráfica de las concentraciones anuales de PM_{2.5} en la estación HS y se comparan con las normativas: chilena (20 µg/m³), de la EPA (12 µg/m³), de la UE (25 µg/m³) y de la OMS (10 µg/m³). Se cumplen durante todo el periodo analizado con las normativas de Chile, de la EPA y de la UE; no así con el valor guía de la OMS, que es superado para casi todo el periodo analizado, excepto el año 2016.

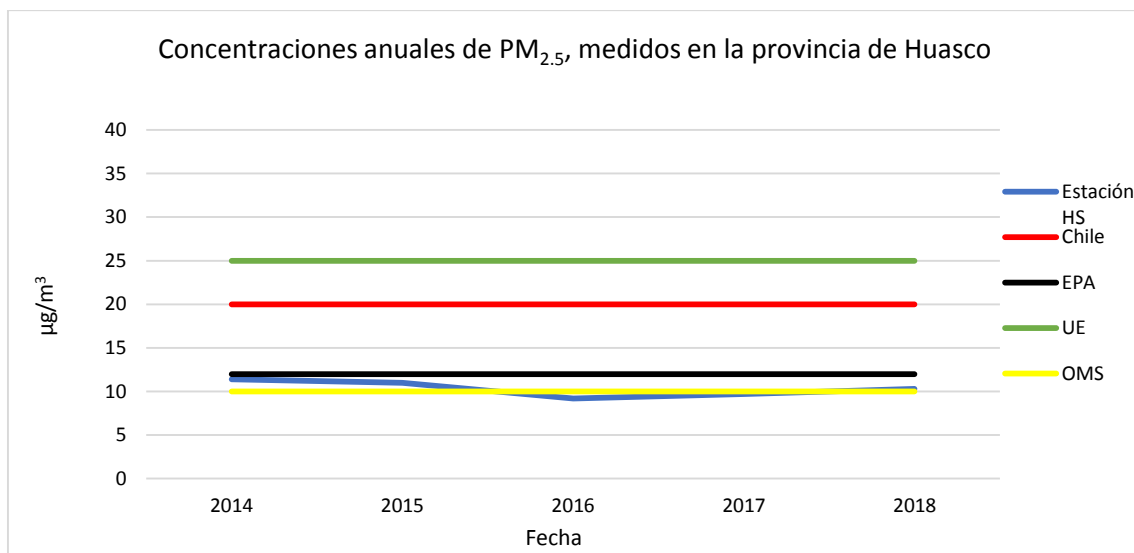


Figura 9.32. Concentraciones anuales de PM_{2.5} en la estación HS, y valores límites según la normativa chilena, de la EPA, de la UE y de la OMS.

Las principales fuentes de emisión de PM_{2.5} en la provincia de Huasco son las centrales termoeléctricas, la mina a Cielo Abierto Los Colorados y el puerto, pero no es posible determinar cuál es la más importante, ya que la estación analizada no está ubicada en una zona favorecida por la dispersión de contaminantes desde las fuentes indicadas, por lo que es recomendable instalar aparatos o nuevas estaciones que midan la concentración de PM_{2.5} en zonas cercanas a las fuentes de contaminación mencionadas.

El plan de descontaminación de la zona es preventivo y fue establecido el año 2016, tiene un plazo de 10 años para ser implementado, por lo que no es posible determinar los efectos de este.

Al comparar el promedio y la desviación estándar de la estación HS, se verifica que estos son diferentes, lo que indica que las concentraciones de PM_{2.5} varían a través del tiempo. Por otro lado, se determinó que este contaminante tiene un comportamiento cíclico anual.

Las concentraciones más altas se produjeron el año 2015, lo que se asocia a los aluviones de ese año; luego se verifica una disminución en el 2016, pero las concentraciones se mantienen aproximadamente constante los años 2017 y 2018.

Se cumple con la normativa chilena y el valor estipulado por la EPA, no así con el valor guía de la OMS, el cual es superado en el año 2014, 2015 y 2016. Como se indicó, es importante revisar los valores límites estipulado por Chile para PM_{2.5}, ya que en el caso del valor límite diario este supera en 1,4 veces el de la EPA y en 2 veces el de la OMS. El valor límite anual chileno es 1,25 veces menor que el de la UE, pero 1,7 veces mayor que el valor de la EPA y 2 veces mayor que el de la OMS.

Conclusiones sobre las concentraciones de PM en la región de Atacama

Las principales fuentes de contaminación por PM en la región de Atacama son las fundiciones, las minas a cielo abierto, los puertos y las centrales termoeléctricas.

En Copiapó y Huasco se verifica que tanto las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ han cambiado con el tiempo; disminuyendo levemente. Además, en las estaciones medidas, las concentraciones tienen un ciclo anual, en donde los mayores valores se miden en invierno y otoño, producto que la dispersión de contaminantes es menor, entonces estos permanecen en las cercanías de las estaciones.

En Copiapó, en términos generales, se cumple con la normativa chilena tanto para PM_{10} como para $PM_{2.5}$, excepto el año 2015, que no se cumple con el valor límite diario estipulado para PM_{10} . En cuanto al valor dado por la EPA, se cumple con el valor límite diario para PM_{10} , no así con el valor límite diario para $PM_{2.5}$ y los valores límites anuales recién se cumplen el 2018. El valor dado por la OMS es superado casi todo el tiempo, excepto el año 2018, tanto para el límite diario y anual de $PM_{2.5}$.

En Huasco, se cumple con las normativas referentes a $PM_{2.5}$: de Chile, de la UE y de la EPA, en cambio el valor guía de OMS tanto diario como anual se cumple solo el 2018.

Es Importante destacar que las estaciones de monitoreo analizadas no se encuentran en las zonas más cercanas a las fuentes de emisión de material particulado y la dispersión no favorece que se mueva hacia esas estaciones. Según esto, y como se dijo anteriormente se requiere medir PM en otras zonas y revisar la normativa chilena, pues los valores límites están en la mayoría por sobre los valores de la UE y siempre son superiores a los entregados por EPA y la OMS.

No se cuenta con una completa red de monitoreo de calidad del aire para PM, ya que solo se tienen datos validados en las ciudades de Copiapó y Huasco, por lo que se sugiere la instalación de aparatos que midan correctamente este contaminante en las estaciones existentes e instalar nuevas estaciones en las zonas donde no existen, siendo conveniente medir este contaminante en áreas cercanas a las fundiciones, los puertos, las termoeléctricas y las ciudades.

Se deben mantener controlas las concentraciones de PM, porque pueden provocar que la población de la región se vea afectada a enfermedades cardiovasculares, respiratorias y a cáncer de pulmón.

10. Conclusiones y Recomendaciones

Las principales fuentes de contaminación de la región de Atacama son las fundiciones, las centrales termoeléctricas, las minas a cielo abierto y los puertos. De los contaminantes analizados: SO_2 , NO_2 , NO , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, el principal problema lo constituyen el dióxido de azufre y luego el material particulado, esto se ratifica porque tanto en Chañaral como en Copiapó se realizaron planes de descontaminación, en 1998 y 1995, respectivamente, ambos con el objetivo de disminuir las emisiones de SO_2 y PM en las zonas cercanas a la fundiciones.

Para el caso del SO_2 , las principales fuentes de emisión de este contaminante son las fundiciones, las termoeléctricas y el puerto. La provincia que tiene la zona más contaminada es la de Chañaral, específicamente la zona cercana a la fundición Potrerillos, porque cuenta con las concentraciones de SO_2 más altas. Las concentraciones diarias promediaron $546 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Doña Inés (DI) y CAP, respectivamente, sobrepasando los límites diarios estipulados por Chile, la UE y la OMS, y el valor límite anual indicado por Chile. En la provincia de Copiapó, la estación Pai es la que sobrepasa los límites normativos durante todo los años analizados, las otras estaciones sobrepasaron los límites establecidos por Chile hasta el año 1998, el límite establecido por la UE hasta el año 2001 y el valor indicado por la OMS es sobrepasado por todas las estaciones durante todo el tiempo analizado, los promedios de las concentraciones de SO_2 están entre 12 y $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la provincia de Huasco se cumple con la normativa chilena y de la UE, no así con el valor dado por la OMS. Las concentraciones promedio diarias van de 9 a $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la provincia de Chañaral y de Copiapó se implementaron planes de descontaminación. En la de Copiapó se puede notar que las concentraciones diarias de SO_2 bajaron notoriamente gracias a ese plan, pues se cuenta con un análisis temporal desde el año 1993 al 2009 y el plan fue establecido en 1998. La eficacia del plan implementado el año 1995 no se puede visualizar en la provincia de Chañaral, ya que los datos validados se encuentran entre el año 2001 al 2010, aunque el último año se notó una baja significativa, la cual no puede afirmarse que sea una tendencia, porque no se cuenta con los datos de los años siguiente. Tampoco se logró determinar la razón de este descenso, aunque se formularon las hipótesis de cambio en la concentración de S del combustible utilizado en la fundición y/o la implementación de nueva tecnología de captura de SO_2 . En Chañaral a pesar de las altas concentraciones, no se ha implementado un nuevo plan, pues donde se encuentra la estación DI actualmente se rige y cumple con la legislación correspondiente a las Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo. A pesar de que en CAP no se cumple con las normativas de calidad del aire, no se ha realizado otro plan de descontaminación, porque se trata de una zona aislada y puntual de contaminación. En Huasco recién se promulgó un plan de prevención de contaminación atmosférica el año 2016, pero solo para limitar las concentraciones de PM , no considerando el SO_2 , esto es, porque las concentraciones se han mantenido estables, por lo menos eso se observa hasta el año 2010, último año con datos.

En cuanto a los óxidos de nitrógeno, las principales fuentes de emisiones antropogénicas en la región son las centrales termoeléctricas y los puertos. Solo fue posible analizarlos en la provincia de Huasco, específicamente en la ciudad de Huasco y sus concentraciones se han mantenido estables los años analizados: 2002 al 2010 y las concentraciones diarias promediaron para el NO_2

8,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para el NO 5,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, las concentraciones anuales de NO₂ cumplen con las normativas: de Chile, de la EPA, de la UE y de la OMS.

Las principales fuentes de contaminación por PM en la región de Atacama son las fundiciones, las minas a cielo abierto, los puertos y las centrales termoeléctricas. PM₁₀ solo cuenta con medidas en la ciudad de Copiapó, específicamente en las estaciones CS y LV, pero en distintos periodos de tiempo, desde el año 2013 al 2018 y en el año 2003, respectivamente, por lo que no son comparables. El promedio de las concentraciones diarias para PM₁₀ estuvo entre 9 y 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para PM_{2.5} se cuenta con medidas en la ciudad de Copiapó, específicamente en CS, desde los años 2013 al 2018 y sus concentraciones diarias promediaron 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la ciudad de Huasco, entre el 2014 al 2018 las concentraciones diarias promediaron 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En los años analizados, se puede verificar que las mayores concentraciones de PM se dieron el 2015, producto de los aluviones.

En cuanto al cumplimiento de la normativa, en Copiapó, en términos generales, se cumple con la normativa chilena tanto para PM₁₀ como para PM_{2.5}, excepto el año 2015, que no se cumple con el valor límite diario estipulado para PM₁₀. En cuanto al valor dado por la EPA, se cumple con el valor límite diario para PM₁₀, no así con el valor límite diario para PM_{2.5} y los valores límites anuales recién se cumplen el 2018. El valor dado por la OMS es superado casi todo el tiempo, excepto el año 2018, tanto para el límite diario y anual de PM_{2.5}. En Huasco, se cumple con la ley chilena, de la UE y de la EPA para PM_{2.5}, en cambio el valor guía de OMS tanto diario como anual se cumple desde el 2018.

Para toda la región los factores que influyen en la dispersión de los contaminantes son la ubicación geográfica y la cercanía con las fuentes de contaminación. Mientras más cercana este la estación de la fuente o si el viento sopla desde la fuente a la estación, las concentraciones medidas serán mayores. Otro factor importante es la geografía, pues los cerros impiden que los contaminantes se muevan y los mantienen en el sector. Las zonas costeras favorecen la dispersión de contaminantes, en cambio los valles impiden que los contaminantes se dispersen. Además, en la costa el viento se mueve en las direcciones sur-suroeste, suroeste, oeste-suroeste y oeste la mayor parte del año, en cambio en el valle el viento sopla en dirección norte, noreste y sur.

La mayoría de las estaciones mostraron un comportamiento cíclico anual, pues los valores más altos tuvieron lugar en otoño e invierno, esto porque los gases se dispersan menos, pues las condiciones meteorológicas, las bajas temperaturas, la baja velocidad del viento y la capa de inversión térmica cercana a la superficie producen que los gases permanezcan estables en la baja atmósfera. Esta situación mejora en primavera y verano, ya que las condiciones atmosféricas dispersan mejor los contaminantes.

Las recomendaciones son las siguientes:

- Se recomienda instalar nuevas estaciones de monitoreo en la región de Atacama. Se propone instalar estaciones de monitoreo de la calidad del aire que midan las concentraciones de SO₂, NO₂, NO, PM₁₀ y PM_{2.5} en:

- Provincia de Chañaral: en la ciudad de Chañaral, por encontrarse en zona portuaria, en la ciudad de El Salvador por encontrarse a 25 km de la fundición Potrerillos y a menos de 4 km de la mina a cielo abierto El Salvador.
- Provincia de Copiapó: en la ciudad de Caldera, por tratarse de una ciudad-puerto.
- Provincia de Huasco: en la ciudad de Vallenar, por ser el segundo núcleo urbano de la región con 51.917 habitante, por estar a 30 km de la mina a cielo abierto Los Colorados y a 50 km del puerto de Huasco y de las centrales termoeléctricas de la provincia: Guacolda, Huasco TG y Huasco Vapor.

- Se recomienda revisar el funcionamiento de las estaciones actuales en la región de Atacama, pues en la página web del SINCA se indica que se cuentan con las concentraciones de más contaminantes, pero al momento de descargar la información, se cuenta con menos del 34% de los datos:

- Provincia de Chañaral: en las estaciones DI y CAP se informan que mide PM_{10} , pero en ambos casos se cuenta con menos del 34% de los datos.
- Provincia de Copiapó: en la estaciones C, Pai, SF y TA se informan que mide PM_{10} , pero en todas las estaciones se cuenta con menos del 33% de los datos.
- Provincia de Huasco: en la estación F se informa que se miden PM_{10} y $PM_{2.5}$, pero se cuenta con menos del 34% de los datos, en M se informa que se miden PM_{10} y NO_x , pero se cuenta con menos del 34% de los datos y en ME se informa que se mide SO_2 , pero no cuenta con datos.

En el caso que los equipos de estas estaciones no funcionen, se deben cambiar por nuevos aparatos de medición de estos contaminantes.

- Se recomienda instalar nuevos aparatos en las siguientes estaciones existen:

- Provincia de Chañaral: en las estaciones DI y CAP se sugiere instalar un medidor de $PM_{2.5}$, porque estas están muy cerca de la fundición Potrerillos.
- Provincia de Copiapó: en CS se recomienda instalar un medidor de SO_2 , en las estaciones Pai, SF, LV y TA medidores de $PM_{2.5}$, en Pab medidores de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . La razón de la instalación de estos medidores es porque están cerca de la fundición Hernán Videla Lira y de la mina a cielo abierto La Candelaria.
- Provincia de Huasco: como las estaciones existentes están cerca del puerto y de las centrales termoeléctricas se recomienda que en la estación HS se instalen aparatos que midan SO_2 , NO, NO_2 y $PM_{2.5}$, en ME, SM1, SM2 y SM8 se debería medir: NO, NO_2 , PM_{10} y $PM_{2.5}$. No se cree necesario instalar más aparatos de medidas de contaminantes en SM3, SM4, SM5, SM6 y SM7 porque están a poca distancia y entre SM2 y SM8.

- Se recomienda revisar la legislación Chilena e intentar igualar los valores límites a los sugerido por la OMS, que es el organismo que se preocupa que las concentraciones de contaminante no afecten la salud de las persona.

- Por tratarse de una zona minera se recomienda crear Normas de Calidad del Aire en Chile para metales como por ejemplo: arsénico, mercurio y cadmio, empleando los valores límites entregados por la OMS.

- Se recomienda revisar el D.S. N° 594/99, sobre las Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo, especialmente lo relacionado a las concentraciones de SO₂, pues el valor límite ponderado mínimo de 1600 µg/m³ supera en 6,4 veces al valor límite de 250 µg/m³ de la normativa chilena y el límite ponderado máximo de 4000 µg/m³ supera en 16 veces el límite chileno, el cual ya es alto si se compara con el dado por la OMS.

11. Bibliografía

ARCADIS. (2010). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Planta Desalinizadora Minera Candelaria. Capítulo 5. Línea de Base Clima y Meteorología, pp. 1- 20.

BCN. (1992). Decreto 4 Exento, establece Normas de Calidad del Aire para Material Particulado Sedimentable en la Cuenca del Rio Huasco III Región. Fecha publicación: 26 de mayo de 1992. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=95904&idVersion=1992-05-26>

BCN. (1993). Decreto 255, declara Zona Saturada por Anhídrido Sulfuroso el Área Circundante a la Fundición Hernán Videla Lira, III Región. Fecha Publicación: 18 de diciembre de 1993. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=11579>

BCN. (1995). Decreto 180, aprueba Plan de Descontaminación de la Fundición Hernán Videla Lira de ENAMI, en Términos eue Indica. Fecha Publicación: 09 de enero de 1995. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=10563>

BCN. (1997). Decreto 18, declara Zona Saturada por Anhídrido Sulfuroso y Material Particulado Respirable al Área que Indica. Fecha Publicación: 16 de abril de 1997. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=70672>

BCN. (1998). Decreto 179, establece Plan De Descontaminación para la Zona Circundante a la Fundición de Potrerillos de la División Salvador de Codelco Chile. Fecha Publicación: 14 de junio de 1999. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=137625&idVersion=1999-06-14>

BCN. (1999). Decreto N° 594, aprueba Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo. Fecha publicación: 29 de abril de 2000. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=167766>

BCN. (2011). Decreto 60, establece Especificaciones de Calidad de Combustibles que Indica. Fecha publicación: 17 de marzo de 2012. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1038133&idVersion=2013-10-18>

BCN. (2011). Decreto 40, declara Zona Latente por Material Particulado Respirable PM₁₀, como Concentración Anual, a la Localidad de Huasco y su Zona Circundante. Fecha publicación: 23 de mayo de 2012. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1040270&idVersion=2012-05-23>

BCN. (2016). Decreto 38, establece Plan de Prevención de Contaminación Atmosférica para la Localidad de Huasco y su Zona Circundante. Fecha publicación: 30 de agosto de 2017. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1107021>

BCN. (2016). Decreto N° 18, aprueba reglamento que fija las obligaciones y procedimientos relativos a la identificación de contribuyentes afectos, y que establece los procedimientos administrativos necesarios para la aplicación del impuesto que grava las emisiones al aire de material particulado, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y dióxido de carbono conforme lo dispuesto en el artículo 8° de la ley n° 20.780. Fecha publicación: 30 de diciembre de 2016.

Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile:
<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1098399>

BCN. (2018). Información Territorial: Región de Atacama. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/nuestropais/region3/>

Becerra, M. Termoeléctricas envenenan Huasco. Obtenido de Punto Final: <http://www.puntofinal.cl/699/Huasco.php>

Central Energía. (2018). Mapa de centrales. Obtenido de Central de información y discusión de energía en Chile: <http://www.centralenergia.cl/centrales/mapa-centrales-operacion/>

Climate data. (2018). Clima Atacama. Obtenido de Climate data: <https://es.climate-data.org/location/147351/>

Codelco. 2002. Codelco cerró último horno de reverbero. Obtenido de Corporación Nacional del Cobre: https://www.codelco.com/codelco-cerro-ultimo-horno-de-reverbero/prontus_codelco/2011-02-17/194753.html

Codelco. 2010. Reporte de Sustentabilidad 2010. Obtenido de Corporación Nacional del Cobre: [https://www.codelco.com/flipbook/reporte_sustentabilidad/2010/Reporte-Codelco-2010-\(Jul\).pdf](https://www.codelco.com/flipbook/reporte_sustentabilidad/2010/Reporte-Codelco-2010-(Jul).pdf)

Codelco. 2011. Reporte de Sustentabilidad 2011. Obtenido de Corporación Nacional del Cobre: https://www.codelco.com/flipbook/reporte_sustentabilidad/2009/pdf/reporte2009.pdf

Codelco. 2017. Reporte de Sustentabilidad 2017. Obtenido de Corporación Nacional del Cobre: https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20180614/asocfile/20180614122058/reporte_sustentabilidad_2017_codelco.pdf, pp. 1 – 97.

Codelco División El Salvador. 2011. Informe de Sustentabilidad 2011 División Salvador. Obtenido de Corporación Nacional del Cobre: https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20120905/asocfile/20120905115019/division_salvador.pdf

Comité Nacional Chileno de Grandes Presas. (2018). Directorio de Presas. Obtenido de Comité Nacional Chileno de Grandes Presas: <http://www.icoldchile.cl/directorio/suelo-enrocado/santa-juana/>

Donoso, G. 2018. Análisis: Petcoke como Fuente de Energía, Amenaza Potencial para el Sector Agrícola y Forestal. Departamento de Economía Agraria, Pontificia Universidad Católica de Chile, pp. 8 – 11.

Directemar. (2017). Boletín Estadístico Marítimo. Obtenido de Armada de Chile, Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante: <http://web.directemar.cl/estadisticas/maritimo/2017/BAEM2017.pdf>, pp. 1 -221.

ENAMI. (2017). Reporte de Sustentabilidad 2017. Obtenido de Empresa Nacional de la Minería: <https://www.enami.cl/api/Descarga?f=/Shared+Documents/ReporteSust2017-ENAMI-bfinal.pdf&f=/Shared+Documents/ReporteSust2017-ENAMI-bfinal.pdf>

European Union Law. (2008). Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>

Fundación Terram (2018). Informe: Termoelectricidad a Carbón y las Precarias Normativas de Emisión y Calidad del Aire en Chile. Comunicación para el Examen Periódico Universal, (EPU) Chile, pp. 1 - 12.

Generadoras de Chile. (2018). Obtenido de Generadoras de Chile: <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-termica>

Griem, W. (2018). Clima de la Región Atacama: Aluvión 2015. Obtenido de GeoVirtual2 y Museo Virtual: <https://www.geovirtual2.cl/Clima/Aluvion-Atacama-25M-01.htm>

Instituto Nacional de Ecología. Manual 3: Redes Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire.

Grijalba, V., (2016). Geología y Análisis Histórico-Meteorológico del Aluvión de Marzo de 2015 en Chañaral, Atacama. Memoria para Optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, pp. 1- 110.

INE. (2017). Resultados Definitivos Censo 2017. Obtenido del Instituto Nacional de Estadística: http://www.censo2017.cl/wp-content/uploads/2017/12/Presentacion_Resultados_Definitivos_Censo2017.pdf

Instituto de Asuntos Públicos. (2002). Informe país: Estado del medio ambiente en Chile. Universidad de Chile. Ediciones LOM.

Instituto Nacional de Estadística de Chile. (2017). Informe Anual 2017: Medio Ambiente. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística: <http://www.ine.cl/docs/default-source/publicaciones/2017/informe-anual-de-medio-ambiente-2017.pdf?sfvrsn=8>, pp. 1 – 205.

Santibáñez F., Santibáñez P., González P. (2016). Informe Final: Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050. Ministerio del Medio Ambiente.

Meteoblue. (2018). Model Climate. Obtenido de Meteoblue: [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/modelclimate/copiap%C3%B3_chile_3893656]

MINAMBIENTE. (2010). Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire. Obtenido de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Dise%C3%B1o.pdf

NAAQS. (2015). NAAQS Table - Criterial Air Pollutants. Obtenido de Enviromental Protection Agency: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>

ODEPA. (2018). Información Regional 2018: Región de Atacama. Obtenido de Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (Odepa) del Ministerio de Agricultura de Chile: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/02/Atacama.pdf>

OMS. (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y del dióxido de azufre. Ginebra.

OMS. (2016). Mapa Global: Ambient Air Pollution. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <http://maps.who.int/airpollution/>

Pérez, J., (2017). Problemática de las Fundiciones de Cobre en Chile y Lean Management como Metodología de Gestión. Tesis para optar al grado de Magister en Gestión y Dirección de Empresas. Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, pp. 1 – 38.

Pontificia Universidad Católica de Chile. (2015). Diagnostico Preliminar. Adaptación ambiental y salud pública post aluvión: Chañaral y Atacama, pp. 1 – 39.

Sanchez, J., Romieu, I., Ruiz, S., Pino, P. y Gutiérrez M. (1999). Efectos agudos de las partículas respirables y del dióxido de azufre sobre la salud respiratoria en niños del área industrial de Puchuncaví, Chile. Rev Panam Salud Pública. 6: pp. 384 - 391.

SEA. (2018). Región de Atacama. Obtenido de Servicio de Evaluación Ambiental: <http://www.sea.gob.cl/regiones/region-de-atacama>

SERNAGEOMIN. (2017). Anuario de la Minería de Chile 2017. Obtenido de Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN): http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/06/Anuario_2017.pdf

Minera La Candelaria, la cual el año 2016 produjo un total de 135,4 miles de toneladas métricas de cobre

SERNATUR. (2015). Plan de acción región de Atacama 2014-2018: Sector turismo. Obtenido de Servicio Nacional de Turismo de Chile: <https://www.sernatur.cl>

SINCA. (2018). Estaciones de monitoreo de la calidad del aire de la región de Atacama. Obtenido del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire: <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/III>

SONAMI. (2016). 25M Atacama: Aluvión en el desierto. Pp. 1 – 109.

Squeo, F., Arancio, G. y Gutierrez J. (2008). Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su conservación: Región de Atacama. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena Chile, 3: pp. 25 – 42.

Vargas, C. (2011). Efectos de la fracción gruesa (PM_{10-2.5}) del material particulado sobre la salud humana. Revisión Bibliográfica Ministerio de Salud, pp. 1 – 37.

WHO. (2018). World Health Organization. Obtenido de: http://www.who.int/topics/air_pollution/en/